

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Katia Ritoša

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Tei Žakuli na uloženom vremenu, korisnim savjetima i podršci prilikom izrade diplomskog rada. Također, zahvaljujem se na prenesenom znanju proteklih godina, uvođenju u područje znanstvenog rada te ponajviše na motivaciji da uvijek može bolje.

Zahvaljujem se roditeljima koji su mi najveća podrška u životu te prijateljima i bližnjima koji su bili uz mene tijekom studija.

Katia Ritoša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Katia Ritoša** Mat. br.: 0035194607

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba pojednostavljenih metoda norme ISO 52016-1:2017 s detaljnim računalnim programom za energijsko modeliranje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of the Simplified Methods of the ISO 52016-1:2017 Standard and the Detailed Energy Modeling Software**

Opis zadatka:

U zemljama Europske Unije predviđena je zamjena trenutno važeće norme ISO 13790:2008 za proračun energijskih svojstva zgrade sa znatno složenijom normom ISO 52016-1:2017. Cilj rada je usporedba nove norme s rezultatima detaljnih simulacija energijskog modela zgrade u svrhu procjene greške modela. Usporedbu je potrebno provesti analizom potrebne energije za grijanje i hlađenje referentne NZEB (*nearly-zero energy building*) bolnice u kontinentalnoj klimi Republike Hrvatske. Kao podlogu za usporedbu metoda koristiti energijski model referentne bolnice izrađen u računalnom programu TRNSYS.

Rad treba sadržavati:

- opis korištenih modela iz norme,
- opis analizirane zgrade,
- usporedbu potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje dobivenu detaljnim računalnim simulacijama i normom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.

Zadatak zadao:



doc. dr. sc. Tea Žakula

Datum predaje rada:

29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Norma EN ISO 52016	4
2.1. O metodi proračuna	4
2.2. Zoniranje	4
2.2.1. Koraci zoniranja.....	5
2.2.2. Nekondicionirane zone.....	7
2.2.3. Toplinski izolirane ili neizolirane zone	9
2.3. Satna metoda proračuna	9
2.3.1. Pretpostavke proračuna	10
2.3.2. Period inicijalizacije.....	11
2.3.3. Samopostignuta temperatura	11
2.3.4. Energijska bilanca građevnog elementa.....	11
2.3.5. Energijska bilanca zone.....	13
2.3.6. Dopunske jednadžbe	13
2.3.7. Proračun nekondicionirane zone.....	16
2.3.8. Rješavanje sustava jednadžbi	17
3. Razvoj računalnog algoritma proračuna	18
3.1. Primjer zadavanja matrice	19
3.1.1. Raspisivanje jednadžbi.....	19
3.1.2. Formiranje konstanti	21
3.1.3. Formiranje matrice.....	24
3.2. Algoritam toka proračuna.....	25
4. Referentna zgrada NZEB bolnice u kontinentalnoj Hrvatskoj	27
4.1. Geometrija i ovojnica zgrade	27
4.2. Zoniranje zgrade NZEB bolnice.....	30
4.3. Model zgrade	32
5. Analiza rezultata.....	34
5.1. Usporedba proračuna prema normi i simulacije u programu TRNSYS	34
5.2. Usporedba rezultata za toplinski međusobno izolirane i neizolirane zone	37
5.3. Analiza utjecaja toplinskog kapaciteta zone i elemenata ovojnice na točnost modela.....	41
5.4. Analiza utjecaja dobitaka od Sunca kroz prozirne elemente na točnost modela.....	43
5.5. Analiza utjecaja promjene svojstava prozirnih elemenata na točnost modela	44
5.6. Analiza kombiniranog utjecaja dobitaka od Sunca, unutarnjih dobitaka i infiltracije na točnost modela.....	47
5.7. Analiza odstupanja proračuna prema normi u odnosu na simulaciju	50
6. Zaključak.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1.	Vanjska nekondicionirana zona (lijevo) i unutarnja nekondicionirana zona (desno) [1]	8
Slika 2.	Koraci u provedbi proračuna	18
Slika 3.	Algoritam toka proračuna	26
Slika 4.	Vanjski izgled NZEB bolnice	27
Slika 5.	Podjela na zone prizemlje	32
Slika 6.	Podjela na zone referentni kat	32
Slika 7.	Godišnja potreba za grijanjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	34
Slika 8.	Godišnja potreba za grijanjem po mjesecima dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	35
Slika 9.	Godišnja potreba za hlađenjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	36
Slika 10.	Godišnja potreba za hlađenjem po mjesecima dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	36
Slika 11.	Godišnja potreba za grijanjem po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona	37
Slika 12.	Relativno odstupanje grijanja po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona	38
Slika 13.	Godišnja potreba za grijanjem po mjesecima prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona	39
Slika 14.	Godišnja potreba za hlađenjem po zonama prilikom usporedbe toplinski izoliranih zona	39
Slika 15.	Relativno odstupanje hlađenja po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona	40
Slika 16.	Godišnja potreba za hlađenjem po mjesecima prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona	41
Slika 17.	Relativno odstupanje potrebe za grijanjem i hlađenjem pri promjeni unutarnjeg kapaciteta	42
Slika 18.	Relativno odstupanje potrebe za grijanjem i hlađenjem nakon promjene kapaciteta zidova	42
Slika 19.	Godišnja potreba za grijanjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	43
Slika 20.	Godišnja potreba za hlađenjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a	44
Slika 21.	Godišnja potreba za grijanjem po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata	45
Slika 22.	Relativno odstupanje grijanja po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata	46

Slika 23.	Godišnja potreba za hlađenjem po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata	46
Slika 24.	Relativno odstupanje hlađenja po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata	47
Slika 25.	Relativno odstupanje grijanja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemare unutarnji dobici	48
Slika 26.	Relativno odstupanje hlađenja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemari infiltracija.....	49
Slika 27.	Relativno odstupanje grijanja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemare unutarnji dobici i infiltracija	49
Slika 28.	Specifična godišnja potrebna energija za grijanje.....	50
Slika 29.	Specifična godišnja potrebna energija za hlađenje	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav vanjskog zida	28
Tablica 2. Sastav ravnog i kosog krova	28
Tablica 3. Sastav poda iznad negrijanog prostora.....	29
Tablica 4. Sastav unutarnjih zidova.....	29
Tablica 5. Sastav međukatnih konstrukcija	30
Tablica 6. Podjela zgrade na zone i svojstva zona	31

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_{sol,j}$	[-]	prosječni koeficijent adsorpcije Sunčevog zračenja neprozirnog elementa j unutar nekondicionirane zone
$a_{sol;pli;eli}$	[-]	koeficijent adsorpcije Sunčevog zračenja vanjske površine
A_{eli}	[m ²]	površina elementa eli
A_j	[m ²]	površina svakog neprozirnog elementa j nekondicionirane zone
A_{tot}	[m ²]	zbroj površina svih elemenata u zoni
$A_{use;ztc}$	[m ²]	korisna površina zone
A_{wi}	[m ²]	površina prozirnog elementa
$b_{ztu;m}$	[-]	korekcijski faktor nekondicionirane susjedne zone
c_a	[J/kg·K]	toplinski kapacitet unutarnjeg zraka zone
$c_{ztu;h;max}$	[-]	koeficijent koji ograničava pretpostavljenu temperaturu nekondicionirane zone
$c_{ztu;ve}$	[-]	koeficijent kojim se iskazuje doprinos ventilacije u koeficijentu prolaza topline kroz vanjske elemente nekondicionirane zone
$C_{int;ztc}$	[J/K]	unutarnji toplinski kapacitet zone
$f_{int,c}$	[-]	udio unutarnjih dobitaka predanih konvekcijom
$f_{sol,c}$	[-]	udio Sunčevog zračenja predanog konvekcijom
$f_{H/C,c}$	[-]	konvektivni udio topline izmijenjene sa sustavom grijanja ili hlađenja
$F_{fr;ue;ztu;t}$	[-]	prividni udio okvira računat kao omjer ukupne površine neprozirnih elemenata i ukupne površine svih elemenata koji čine granicu prema vanjskom okolišu nekondicionirane zone
$F_{fr;wi}$	[-]	udio okvira u ukupnoj površini prozirnog elementa

$F_{sh;obst;eli;t}$	[-]	faktor zasjenjenja uslijed vanjskih prepreka
$F_{sh;obst;j;t}$	[-]	faktor zasjenjenja uslijed vanjskih prepreka neprozirne površine j
$F_{sh;obst;wi;t}$	[-]	faktor zasjenjenja prozirnog elementa uslijed vanjskih prepreka
$F_{sky;eli}$	[-]	vidni faktor prema nebu
$F_{sol;ue;ztu;t}$	[-]	faktor redukcije Sunčevog zračenja kroz vanjske elemente nekondicionirane zone
$F_{ztc;j;ztu;m}$	[-]	faktor distribucije izmjene topline između nekondicionirane zone i susjednih kondicioniranih zona
$g_{gl;ue;ztu;t}$	[-]	stupanj propuštanja ukupne energije Sunčevog zračenja
$g_{gl;wi;t}$	[-]	stupanj propuštanja ukupne energije Sunčevog zračenja
$h_{ce;eli}$	[W/m ² ·K]	koeficijent prijelaza topline konvekcijom s vanjske površine
$h_{ci;eli}$	[W/m ² ·K]	koeficijent prijelaza topline konvekcijom s unutarnje površine
$h_{pli;eli}$	[W/m ² ·K]	toplinska provodnost između čvora $pli+1$ i čvora pli
$h_{pli-1;eli}$	[W/m ² ·K]	toplinska provodnost između čvora pli i čvora $pli-1$
$h_{re;eli}$	[W/m ² ·K]	koeficijent prijelaza topline zračenjem s vanjske površine
$h_{ri;eli}$	[W/m ² ·K]	koeficijent prijelaza topline zračenjem s unutarnje površine
$H_{tr;tb;ztc}$	[W/K]	koeficijent prolaza topline uslijed toplinskih mostova
$H_{tr;ue;m}$	[W/K]	koeficijent prolaza topline transmisijom između nekondicionirane zone i okoliša
$H_{ve;vei;t}$	[W/K]	koeficijent prolaza topline uslijed ventilacije
$H_{ztc;j;ztu;m}$	[W/K]	koeficijent prolaza topline između nekondicionirane zone i susjedne kondicionirane zone
$H_{ztu;tot;m}$	[W/K]	zbroj koeficijenata prolaza topline između nekondicionirane zone, susjedne kondicionirane zone i okoliša
$I_{sol,dif;eli;t}$	[W/m ²]	difuzno Sunčevo zračenje na vanjsku površinu

$I_{sol,dir;eli;t}$	[W/m ²]	direktno Sunčevo zračenje na vanjsku površinu
$I_{sol,dif;j;t}$	[W/m ²]	difuzno Sunčevo zračenje na neprozirnu površinu j
$I_{sol,dir;j;t}$	[W/m ²]	direktno Sunčevo zračenje na neprozirnu površinu j
$I_{sol,dif;wi;t}$	[W/m ²]	difuzno Sunčevo zračenje na vanjsku površinu prozirnog elementa
$I_{sol,dir;wi;t}$	[W/m ²]	direktno Sunčevo zračenje na vanjsku površinu prozirnog elementa
I_{tb}	[m]	duljina toplinskog mosta
R_c	[m ² ·K/W]	toplinski otpor prozirnog elementa
$R_{c;eli}$	[m ² ·K/W]	toplinski otpor građevnog elementa eli uz tlo
$R_{gr;eli}$	[m ² ·K/W]	toplinski otpor sloja tla neposredno uz građevni element eli
$R_{se;v}$	[m ² ·K/W]	toplinski otpor vanjske površine prozirnog elementa u vertikalnom položaju
$R_{si;v}$	[m ² ·K/W]	toplinski otpor unutarnje površine prozirnog elementa u vertikalnom položaju
$T_{e;a;t}$	[°C]	temperatura okolišnog zraka u promatranom vremenskom koraku t
$T_{e;t}$	[°C]	temperatura zraka s vanjske strane elementa
$T_{int;a;ztc;t}$	[°C]	temperatura unutarnjeg zraka zone
$T_{int;a;ztc;t-1}$	[°C]	temperatura unutarnjeg zraka zone u prethodnom vremenskom koraku $t-1$
$T_{int;op;ztc;t-1}$	[°C]	unutarnja postavna temperatura susjedne kondicionirane zone u prethodnom vremenskom koraku $t-1$
$T_{pli;eli;t}$	[°C]	temperatura čvora pli
$T_{pli;eli;t-1}$	[°C]	temperatura čvora $pli-1$
$T_{pli-1;eli;t}$	[°C]	temperatura u čvoru $pli-1$
$T_{pli+1;eli;t}$	[°C]	temperatura u čvoru $pli+1$

$T_{sup;vei;t}$	[°C]	temperatura dobavnog zraka za ventilaciju
$T_{ztu;t}$	[°C]	temperatura zraka nekondicionirane zone
U_c	[W/m ² ·K]	koeficijent prolaza topline prozirnog građevnog elementa
$q_{int;ztc;t}$	[W/m ²]	unutarnji toplinski dobici svedeni na korisnu površinu
$q_{V;k;t}$	[m ³ /s]	protok zraka uslijed ventilacije ili infiltracije
Δt	[s]	trajanje vremenskog koraka
$\Delta T_{sky;t}$	[K]	prosječna razlika prividne temperature neba i temperature okolišnog zraka
$\kappa_{m;int;a;ztc}$	[J/m ² ·K]	toplinski kapacitet zraka i namještaja unutar zone sveden na korisnu površinu
$\kappa_{m;eli}$	[J/m ² ·K]	toplinski kapacitet neprozirnog građevnog elementa <i>eli</i> sveden na površinu elementa
$\kappa_{pli;eli}$	[J/m ² ·K]	toplinski kapacitet čvora <i>pli</i> sveden na površinu elementa
ρ_a	[kg/m ³]	gustoća unutarnjeg zraka zone
$\Phi_{H/C;ztc;t}$	[W]	toplinski tok izmijenjen sa sustavom grijanje ili hlađenja
$\Phi_{int;ztu;t}$	[W]	unutarnji toplinski dobici nekondicionirane zone
$\Phi_{int;ztc;t}$	[W]	unutarnji toplinski dobici
$\Phi_{sky;eli;t}$	[W/m ²]	toplinski tok predan zračenjem prema nebu u
$\Phi_{sol;ztc;t}$	[W]	toplinski dobici od Sunčeva zračenja
$\Phi_{sol;ztu;t}$	[W]	dobici uslijed Sunčevog zračenja nekondicionirane zone
$\Psi_{tb;k}$	[W/m·K]	koeficijent transmisije linijskog toplinskog mosta

SAŽETAK

U radu je provedena usporedba proračuna energijskih potreba zgrade prema normi HRN EN ISO 52016-1 i detaljne energijske simulacije u računalnom programu TRNSYS. Norma, izdana 2017. godine, prolazi kroz prijelazno razdoblje i nije još u uporabi. Cilj ovog rada je analiza odstupanja potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje u slučaju kada se postupak proračuna provodi prema normi s rezultatima dobivenim detaljnim računalnim simulacijama. Za potrebe ovog rada razvijen je algoritam kojim se provodi proračun opisan normom, prilikom čega je postupak proračuna satne metode zapisan kao niz jednadžbi i logičkih uvjeta u obliku programskog koda. Temelj rješavanja sustava jednadžbi je njihovo raščlanjivanje na koeficijente te potom grupiranje u matricu konstanti koje stoje uz tražene vrijednosti unutarnjih temperatura i potrebne energije u svakom satu te matricu poznatih, neovisnih varijabli. Usporedba je provedena na primjeru referentne zgrade NZEB (*eng. nearly zero energy building*) bolnice na području kontinentalne Hrvatske na satnoj razini za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Kako bi se upotpunila usporedba provedena je analiza odstupanja rezultata u slučajevima kada su iz modela isključene komponente koje opisuju utjecaj unutarnjih dobitaka, infiltracije te su također varirana svojstva prozirnih elemenata. Promjena svojstva prozirnih elemenata direktno je utjecala na dobitke od Sunca za koje je analiza pokazala da najviše utječu na odstupanje rezultata proračuna prema normi u odnosu na detaljne simulacije. Kada je proračun proveden prema normi ukupna godišnja potrebna energija za grijanje manja je 47,6%, a ukupna godišnja potrebna energija za hlađenje veća je 29,4% od one izračunate simulacijom. U slučaju zamjene prozirnih elemenata neprozirnim odstupanje potrebe za grijanjem smanjeno je na 8,9%, a one za hlađenjem na 1,1%.

Ključne riječi: energijska simulacija zgrade, usporedba metoda proračuna, HRN EN ISO 52016-1, potrebna energija za grijanje i hlađenje

SUMMARY

The subject of this thesis is the energy performance of a building assessment performed according to the HRN EN ISO 52016-1 standard. The aforementioned assessment was compared to the detailed energy simulation by using the computer program TRNSYS. The standard, issued in 2017, is still in the transition process, and has not yet been put to use. The thesis aims at comparing the deviation of the overall heating and cooling energy demand, in cases where the calculation of the demand is carried out according to the standard, with the results presented by the detailed simulation. For the purpose of this study a computer algorithm was developed, which carries out the assessment defined by the standard. The algorithm is based on the hourly calculation method that is computed as a series of equations and logical operators. The equations are solved by separating their coefficients and, afterwards, sorting the coefficients in matrices in such a manner that the coefficients coupled with the estimated inside temperatures and energy needs for every hour form the constant matrix and the free coefficients form the known variables matrix. The comparison of the two assessment methods was performed by using the example of the reference nearly zero energy building for hospital purposes located in the continental area of Croatia. Both calculations were carried out on an hourly basis for a typical meteorological year in the City of Zagreb climate area. In order to complement the comparison, both methods were further analysed in cases where the model excluded internal gains and infiltration. Also, the alterations in properties of the nonopaque elements had a direct impact on solar gains, which consequently resulted in the most significant results deviations. When the assessment was conducted according to the standard, the overall energy heating demand was 47,6% lower and overall cooling energy demand was 29,4% higher compared to the demand calculated based on the simulation. In the case where nonopaque elements were replaced with opaque ones, the heating energy demand deviation was reduced to 8,9% and the cooling energy demand deviation was reduced to 1,1%.

Key words: energy simulation of a building, comparison of assessment methods, HRN EN ISO 52016-1, heating and cooling demand

1. Uvod

S obzirom na to da je stanje tržišta energijom od velikog je ekonomskog, ekološkog i društvenog značaja, vodeća zakonodavna tijela, nacionalne i međunarodne organizacije ulažu velike resurse u razvoj tržišta energije i smanjenje potrošnje energije kroz uvođenje normi, propisa i zakona. Budući da se više od trećine ukupne svjetske potrošnje energije odnosi na sektor zgradarstva, povećanjem energetske učinkovitosti omogućeno je smanjenje energetske potreba na globalnoj razini. Jedan od ključnih koraka za analizu i optimizaciju sustava u zgradama jest točna procjena njihovih energijskih potreba. Postoje mnogobrojni računalni alati kojima je moguće provesti detaljne simulacije, no oni često zahtijevaju višu razinu znanja i ponekad znatno veći utrošak vremena. Stoga je 2008. godine razvijen pojednostavljeni proračun sadržan u normi HRN EN ISO 13790. U svrhu povećanja točnosti proračuna 2017. godine donesena je nova norma HRN EN ISO 52016-1 čiji je cilj približiti način proračuna normom onome korištenom u računalnim simulacijama. U ovom radu provedena je usporedba norme HRN EN ISO 52016-1 i detaljne energijske simulacije u programu TRNSYS prilikom proračuna energijskih potreba zgrade. Odabrana zgrada za usporedbu rezultata je referentna zgrada NZEB (*eng. nearly zero energy building*) bolnice na području kontinentalne Hrvatske za koju je proveden proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb na satnoj razini.

Norma HRN EN ISO 52016-1 „*Energijska svojstva zgrada – Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarne temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 1. dio: Postupci proračuna*“ detaljno opisuje algoritam proračuna energijskih potreba zgrade [1]. Uz navedenu normu donesene su i njezine nadopune HRN EN ISO 52017-1 „*Energijska svojstva zgrada – Osjetna i latentna toplinska opterećenja i unutarne temperature – 1. dio: Opći postupci proračuna*“ [2] te HRI CEN ISO/TR 52016-2 „*Energijska svojstva zgrada – Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarne temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 2. dio: Objašnjenje i obrazloženje norma ISO 52016-1 i ISO 52017-1*“ koje sadrže primjere i upute za proračun [3]. Navedene norme u Europskoj Uniji prolaze kroz prijelazno razdoblje nakon kojega će postati obavezne i u potpunosti zamijeniti normu HRN EN ISO 13790 koja je trenutno u uporabi. Proračun sadržan u novoj normi sastoji se od sustava jednadžbi koje opisuju energijske bilance zone te građevnih elemenata koji ju omeđuju, po uzoru na matematički model kojeg koriste simulacijski alati. Postupak rješavanja jednadžbi zadanih proračunom zahtjeva preoblikovanje jednadžbi te njihovo grupiranje u konstante, koje su potom raspoređene u matrice tako da svakoj zoni zgrade pripada jedan sustav matrica. Sustav se sastoji od matrice

konstanti koja sadrži koeficijente jednadžbi koji stoje uz nepoznanice, a množena je matricom u kojoj se nalaze nepoznanice. Na desnoj strani sustava se nalazi matrica poznatih vrijednosti koja sadrži slobodne koeficijente jednadžbi, one koji nisu množeni nepoznanicama. Rješenje sustava je matrica nepoznanica čije se vrijednosti elemenata računaju operacijom dijeljenja matrice konstanti s matricom poznatih vrijednosti. Budući da se mnogi ulazni parametri proračuna, kao na primjer vanjska temperatura, Sunčevo zračenje, unutarnji dobici, ventilacijski zahtjevi i drugi, mijenjaju u svakom satu, potrebno je postupak formiranja i dijeljenja matrica ponoviti onoliko puta koliko vremenskih koraka sadrži promatrani period proračuna. Osim toga, veličina matrice se povećava dodavanjem građevnih elemenata u pojedinu zonu. Na kraju proračuna se godišnja potreba za grijanjem odnosno hlađenjem računa zbrajanjem energijskih potreba u pojedinim satima.

Računalni program TRNSYS, s kojim se uspoređuje promatrana norma, jedan je od najtočnijih programa za simulaciju energijskih tokova te između ostalog sadrži modul za simulaciju višezonske zgrade. Pri tome koristi detaljne energijske bilance za simulaciju nestacionarnog ponašanja zgrade u ovisnosti o svojstvima ovojnice, vanjskim uvjetima na lokaciji zgrade, unutarnjim dobicima/gubicima, načinu korištenja i slično. Računalni alati kao što je TRNSYS najčešće se koriste u znanstvene svrhe s obzirom da zahtijevaju veću razinu znanja i dulji period za modeliranje promatranih objekata, ulaznih i izlaznih parametara. Uvođenjem nove norme nastoji se povećati točnost proračuna u odnosu na prethodnu normu, pri čemu se teži postići točnost bližu onoj koja se ostvaruje korištenjem detaljnih računalnih simulacija. Povećanje točnosti norme podrazumijeva uvođenje većeg broja jednadžbi, smanjenje broja pojednostavljenja, uvođenje satnih te promjenjivih ulaznih i izlaznih podataka što povećava složenost i trajanje proračuna. U isto vrijeme, normama se nastoji izbjeći visoka razina složenosti kako bi bile primjenjive širokoj grupi stručnjaka.

Prvi dio ovog rada opisuje metodu proračuna i pretpostavke bitne za točno provođenje proračuna, a one uključuju zoniranje, modeliranje susjednih nekondicioniranih prostora i toplinsku izoliranost među zonama. U nastavku su navedene osnovne jednadžbe koje opisuju toplinsku ravnotežu jedne zone te je opisan postupak njihova rješavanja. Zbog velike složenosti sustava koji se rješava, drugi dio rada obuhvaća opis razvijenog računalnog alata kojim se provodi proračun prema normi. Algoritam proračuna programiran je kao skup funkcija u općem programskom jeziku MATLAB. Nakon poglavlja koje opisuje razvijeni algoritam slijedi opis geometrije i svojstava ovojnice analizirane NZEB bolnice, te rasporeda korištenja i zahtjeva za toplinskom ugodnosti s obzirom na režim rada. Zgrada bolnice za simulaciju programom

TRNSYS modelirana je pomoću korisničkog sučelja za višezonsku zgradu TRNBuild, prilikom čega je model prilagođen pretpostavkama iz norme kako bi se omogućila kasnija ravnopravna usporedba. Na kraju rada provedena je analiza uz prikaz dobivenih rezultata. Simulacija i proračun provedeni su više puta s različitim odabirom elemenata ovojnice i ulaznih parametara, kao što su unutarnji dobici i infiltracija, kako bi se identificirali mogući izvori odstupanja. U analizi rezultata dan je uvid u odstupanje rezultata proračunatih algoritmom u skladu s normom i onih dobivenih detaljnom računalnom simulacijom uz opširnija obrazloženja.

2. Norma EN ISO 52016

2.1. O metodi proračuna

Norma sadrži metode proračuna za određivanje: potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora na satnoj ili mjesečnoj razini, unutarnje temperature prostora na satnoj razini, toplinskog odnosno rashladnog opterećenja na satnoj razini kao i metodu proračuna projektnog opterećenja u oba slučaja. U normi se također nalazi proračun potrebne latentne energije za ovlaživanje ili odvlaživanje na satnoj ili mjesečnoj razini, proračun satnog opterećenja i projektnog opterećenja te metoda određivanja stanja dobavnog zraka. Proračuni se mogu provoditi na objektima u stadiju projektiranja, novim, tek izgrađenim, objektima ili onima koji su već u uporabi. Metode proračuna primjenjive su za stambene i nestambene objekte ili samo njihove dijelove. Provedba prethodno navedenih metoda proračuna predviđena je na razini toplinske zone unutar zgrade zbog čega se poseban značaj daje zoniranju.

Prednost korištenja satne metode u odnosu na mjesečnu je mogućnost praćenja utjecaja vremenskih prilika okoliša i promjenjivih uvjeta unutar zgrade koji mogu biti povezani s radnim vremenom, kao što su zahtijevane unutarnje temperature, potreba za ventiliranjem, uključenost opreme, rasvjeta, broj ljudi u prostoru i slično. U mjesečnoj metodi proračuna energijska bilanca zone svedena je na vremensko razdoblje od jednog mjeseca, a utjecaj dinamičkih promjena uzet je u obzir pomoću faktora korekcije koji se formiraju za određeno područje i namjenu objekta iz prethodno provedenih satnih proračuna. Proračuni za potrebe grijanja i hlađenja kod mjesečne metode provode se odvojeno, dok se kod satne metode provode istovremeno. Za razliku od mjesečne metode kod koje se kreiraju faktori korekcije za pojedino podneblje na temelju referentnog objekta, u satnoj metodi je pristup individualan. Satnom metodom se način proračuna približava naprednim energijskim simulacijama energijskih tokova u zgradi te omogućava praćenje nestacionarnog ponašanja zgrade. Upravo zbog toga će u daljnjem radu biti promatrana satna metoda proračuna, koja je detaljno opisana za slučaj proračuna godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje.

2.2. Zoniranje

Toplinska zona (*eng. thermal zone*) je cjelina unutar zgrade koja se sastoji od jednog ili više prostora sličnih karakteristika, a odvojena je od ostatka zgrade građevinskim elementima. Zoniranje je postupak kojim se prostori sjedinjuju ili razdvajaju u različite zone na osnovu orijentacije, dobitaka od Sunca i unutarnjih dobitaka, rasporeda rada, namjene, zahtjeva za

toplinsku ugodnost i slično. Postupak zoniranja je prvi korak proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade, jedinstven je za svaku građevinu te njegova ispravna provedba značajno utječe na preciznost energijskog modela zgrade. U daljnjem tekstu detaljno će biti opisane smjernice za zoniranje prema normi HR EN ISO 52016-1 kroz 10 koraka. Prije provedbe zoniranja potrebno je poznavati geometriju zgrade, raspored i namjenu prostora te parametre rada i planirane termotehničke sustave u svakom prostoru.

2.2.1. Koraci zoniranja

- Korak 1: Procjena kategorije prostora

Svaki je prostor prema projektu definiran kao grijan, hlađen ili nekondicioniran te je prema tome prostore s različitim kombinacijama predviđenih sustava potrebno razdvojiti. Prilikom zoniranja posebna se pažnja posvećuje nekondicioniranim prostorima jer odluka o načinu njihova proračunavanja može dovesti do velikih razlika u energijskom modelu zgrade. U slučaju kada se manji nekondicionirani prostori nalaze unutar granice vanjske ovojnice zgrade, oni se najčešće pridružuju susjednoj kondicioniranoj zoni. Prostori kao što su garaže i spremišta s velikim brojem izmjena zraka ili velikim otvorima prema vanjskom okolišu modeliraju se također kao nekondicionirani. Kada su pretpostavljeni gubici kroz nekondicionirane prostore značajni, za provođenje proračuna potrebno je poznavati njihovu temperaturu, pa se ti prostori modeliraju prema posebnom dijelu norme za proračun toplinske zone bez ugrađenih sustava grijanja ili hlađenja.

- Korak 2: Grupiranje prema kategoriji prostora

Prostori su kategorizirani prema uvjetima korištenja, a time i potrebnim termotehničkim sustavima koji omogućuju zahtijevanu toplinsku ugodnost i razinu kvalitete zraka. Susjedne prostore s istom kombinacijom zahtjeva moguće je ujediniti u jednu toplinsku zonu. Ukoliko postoji nekondicionirani prostor okružen kondicioniranima koje je moguće grupirati u jednu zonu (nekondicionirani prostor znatno manji od kondicioniranih), te ako je isti prostor na granici dvije ili više različitih zona, on se spaja sa zonom s najvećom korisnom površinom poda.

- Korak 3: Grupiranje u slučaju velikih otvora između prostora

U slučaju kada između susjednih prostora postoji veliki otvor ili vrata za koja se pretpostavlja da su uglavnom otvorena, susjedni prostori se spajaju u jednu zonu. Velikim otvorom se smatra jedan ili više otvora na građevnom elementu koji razdvaja susjedne prostore ukupne površine veće od $0,003 \text{ m}^2$ po metru kvadratnom korisne površine promatranog

prostora. Kada susjedne zone nemaju iste uvjete rada, zoni se pridružuje onaj stroži uvjet rada, osim ako nije primjenjivo pojednostavljenje iz koraka 9 i 10.

- Korak 4: Razdvajanje u slučaju različitih zahtjeva

Postojeću građevnu cjelinu unutar zgrade moguće je razdvojiti na više zona kako bi se odvojili dijelovi s različitim zahtijevanim termotehničkim sustavima. Tako se formiraju zone koje zahtijevaju samo grijanje, samo hlađenje, hlađenje s odvlaživanjem, grijanje i hlađenje i slično.

- Korak 5: Daljnje grupiranje prema sličnim uvjetima korištenja

Zahtjevi prostora koji se odnose na toplinsku ugodnost definirani su minimalnom i maksimalnom dozvoljenom temperaturom prostora, kao i minimalnim i maksimalnim sadržajem vlage u zraku. Susjedni kondicionirani prostori s istim zahtjevima mogu se grupirati u jednu zonu, što je također dozvoljeno u slučaju da se zahtjevi u susjednim prostorima značajno ne razlikuju. Da bi se prostori s različitim zahtjevima sjedinili, postavna temperatura ne smije odstupati više od 4 K, a sadržaj vlage više od 0,2 kg/kg suhog zraka. Također, radno vrijeme susjednih prostora ne smije se razlikovati za više od 3 sata, u slučaju da dva prostora imaju iste zahtjeve za toplinsku ugodnost. Na primjer, ako jedan prostor radi vikendom, a drugi ne, oni se ne smiju grupirati u istu zonu.

- Korak 6: Razdvajanje u slučaju specifičnosti podsustava

U slučaju da su u prostoru zahtijevani specifični podsustavi, takve je prostore potrebno odvojiti sukladno pripadajućim normama ili zahtjevima opreme kako bi se omogućila homogenost unutar zone. Specifičnosti podsustava mogu uključivati razliku u udjelu konvekcijom i zračenjem predane topline, rekuperaciju gubitaka ili slično. Ukoliko je moguće pojednostaviti prema koracima 9 ili 10 tada se oni uzimaju u obzir.

- Korak 7: Daljnje dijeljenje za postizanje homogenosti u toplinskoj ravnoteži

Postojeću zonu potrebno je razdijeliti ukoliko nije postignuta homogenost u toplinskoj ravnoteži zone. Ovaj korak je posebno bitan kada se proračunava potreba za rashladnom energijom. Uzrok nehomogenosti unutar zone često su veliki dobici od Sunca u prostorima s velikim staklenim površinama ili toplinski gubici kroz njih. Osim dobika od Sunca, uzrok mogu biti i dobici od ljudi, opreme ili rasvjete. Prilikom proračuna potrebe za grijanjem prostore treba odvojiti u zasebne zone u slučaju da se njihovi dobici ili gubici razlikuju za više od trostruko. Iznimku čine prostore čiji su dobici ili gubici manji od 15 W/m² korisne površine.

U slučaju proračuna potreba za hlađenje također vrijedi uvjet da se unutar prostora dobici ili gubici ne smiju razlikovati za više od trostruko, osim u slučaju prostora s dobicima, odnosno gubicima manjima od 30 W/m^2 korisne površine. Nadalje, da bi se prostori sjedinili u jednu toplinsku zonu njihov toplinski kapacitet ne smije se razlikovati za više od dva razreda u Tablici 21 [1]. Ukoliko je moguće pojednostaviti prema koracima 9 ili 10, tada se oni uzimaju u obzir.

- Korak 8: Grupiranje nekondicioniranih zona

Susjedne nekondicionirane zone moguće je grupirati u jednu.

- Korak 9: Pojednostavljenje u slučaju malih zona

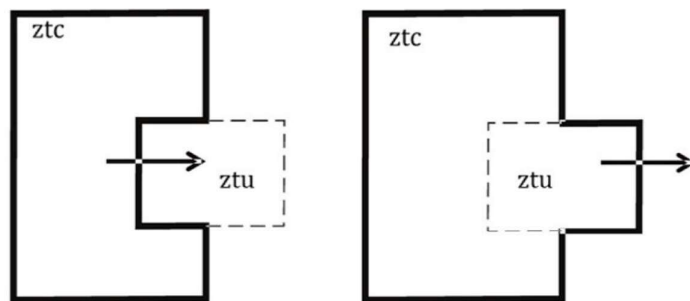
Manja zona se može pripojiti većoj susjednoj ako su zahtijevani isti termotehnički sustavi (korak 4), ali postoje razlike u zahtjevima prostora (korak 5) ili nehomogenosti u toplinskoj ravnoteži (korak 7), u slučaju da je korisna površina pripajane zone manja od 5% korisne površine veće zone. U tom slučaju prilikom proračuna koriste se radni parametri veće zone.

- Korak 10: Pojednostavljenje u slučaju vrlo malih zona

Vrlo male zone mogu se pripojiti većima i u slučaju kada nisu zahtijevani isti termotehnički sustavi (korak 4), ako korisna površina vrlo male zone ne prelazi 1% korisne površine veće. U tom slučaju prilikom proračuna koriste se radni parametri veće zone. Ukoliko vrlo mala zona ima više susjednih zona, ona se pripaja zoni s najsličnijim uvjetima rada.

2.2.2. Nekondicionirane zone

Postoje dvije vrste nekondicioniranih zona, Slika 1., koji se u proračunu razlikuju s obzirom na prijenos topline kroz ovojnici i prostor te uračunavanju dobitaka unutar njega. Kod vanjskih nekondicioniranih zona je kao granica vanjske ovojnice zgrade uzet granični zid između te i susjedne kondicionirane zone, dok kod unutarnjih nekondicioniranih zona granicu ovojnice čini zid koji odjeljuje nekondicioniranu zonu od okoliša. Nekondicionirane se zone u proračunu uglavnom uzimaju kao vanjske, iznimka su slučajevi kada svojstva graničnog zida između kondicionirane i nekondicionirane zone nisu poznata ili kada unutarnji i dobici od Sunca nekondicionirane zone nisu dominantni. Prilikom provođenja proračuna s unutarnjom nekondicioniranom zonom njen volumen i korisna površina poda ne pribrajaju se onima susjedne kondicionirane zone.



Slika 1. Vanjska nekondicionirana zona (lijevo) i unutarnja nekondicionirana zona (desno) [1]

Kako bi se uzeo u obzir utjecaj nekondicioniranih zona koje graniče s kondicioniranim koriste se faktori korekcije. Korekcijski faktor za nekondicioniranu zonu predstavlja omjer koeficijenta prolaza topline između nekondicionirane zone i okoliša te sume koeficijenata prolaza topline između nekondicionirane zone, njoj susjednih kondicioniranih zona i okoliša, a računa se prema jednadžbi (1):

$$b_{ztu;m} = \frac{H_{ztu,e;m}}{H_{ztu,tot;m}} \quad (1)$$

pri čemu je:

$$H_{ztu,tot;m} = \sum_j (H_{ztc;j;ztu;m}) + H_{ztu,e;m} \quad (2)$$

Koeficijenti prolaza topline sadrže komponentu koja predstavlja prijenos topline transmisijom te komponentu ventilacijskih gubitaka, odnosno dobitaka, te se računaju prema jednadžbi (3):

$$H_{ztu,e;m} = (1 + c_{ztu;ve}) \cdot H_{tr;ue;m} \quad (3)$$

U slučaju kada postoji više nekondicioniranih zona koje okružuju kondicioniranu zonu potrebno je izračunati i faktor distribucije korekcije, a koji se računa prema jednadžbi (4). Kada postoji samo jedna susjedna nekondicionirana zona ovaj faktor jednak je jedinici.

$$F_{ztc;j;ztu;m} = \frac{H_{ztc;j;ztu;m}}{\sum_j (H_{ztc;j;ztu;m})} \quad (4)$$

Nekondicionirana zona je posrednik u prijenosu topline između kondicionirane zone i vanjskog okoliša te je prilikom proračuna potrebno poznavati postignutu unutarnju temperaturu nekondicionirane zone. Pretpostavljena temperatura kod unutarnjih nekondicioniranih zona jednaka je postavnoj temperaturi susjedne kondicionirane zone te se isključuje utjecaj unutarnjih i dobitaka od Sunca koji se pribrajaju onima u kondicioniranoj zoni. Kod vanjskih nekondicioniranih zona na postignutu temperaturu utječu unutarnji i dobici od Sunca te se ona proračunava sukladno normi.

2.2.3. Toplinski izolirane ili neizolirane zone

Zgrade koje se sastoje od više prostora različitih namjena i zahtijeva zonirane su prema prethodno opisanom postupku u više zona. Prilikom proračuna višezonske zgrade zone mogu biti modelirane kao međusobno toplinski neizolirane, (*eng. thermally coupled*), što znači da postoji izmjena topline kroz građevne elemente između susjednih zona, ili mogu biti toplinski izolirane, (*eng. thermally uncoupled*). Između toplinski izoliranih zona ne postoji izmjena topline transmisijom kroz građevne elemente niti izmjena topline ventilacijom. Odabir modeliranja višezonske zgrade s međusobno toplinski neizoliranim zonama unosi složenost u proračun. Osim što se povećava broj ulaznih parametara, uvode se i dodatne pretpostavke, kao na primjer smjer strujanja zraka između zona, koje mogu značajno utjecati na točnost rezultata. Stoga je prema preporuci u normi zone poželjno modelirati kao toplinski izolirane, posebno jer se navodi toplinsko povezivanje zona dovodi do zanemarivog povećanja točnosti proračuna uz veću mogućnost greške.

2.3. Satna metoda proračuna

Satna metoda proračuna sastoji se od sustava jednadžbi koje se rješavaju na satnoj bazi, a opisuju nestacionarni model izmjene topline unutrašnjosti zgrade i okoliša kroz neprozirne i prozirne elemente vanjske ovojnice zgrade. Sustav jednadžbi se rješava pomoću matrice za koju je predviđen numerički način proračuna. Rješenja sustava jednadžbi su postignute temperature građevnih elemenata, temperatura unutarnjeg zraka te potrebna energija za grijanje odnosno hlađenje u svakom satu. Satni način proračuna ima tri različite primjene; prvo, njime se može izračunati potrebna energija za grijanje odnosno hlađenje uz poznate unutarnje postavne temperature u režimu grijanja i hlađenja. Također je moguće izračunati postignutu unutarnju temperaturu u slučaju kada je poznat kapacitet ugrađene opreme. Konačno, moguće je dimenzionirati opremu za projektne uvjete, pri čemu se period proračuna skraćuje na

reprezentativni period. Navedene mogućnosti proračuna ovise o tome što je nepoznanica u sustavu jednadžbi, dok je sustav jednadžbi u svim slučajevima isti.

2.3.1. Pretpostavke proračuna

Kako bi se proračun jednoznačno definirao te u nekim segmentima pojednostavio, uveden je niz pretpostavki:

- temperatura zraka jednolična je u cijelom volumenu zone
- površine elemenata su izotermne
- provođenje topline kroz sve elemente je jednodimenzionalno
- akumulacija topline u toplinskim mostovima (linijskim i točkastim) je zanemarena
- čvorovi toplinskih mostova su direktno povezani s unutarnjom i vanjskom temperaturom
- zračni prostor unutar komponenti ovojnice uzet je u obzir kao zračni sloj omeđen izotermnim paralelnim plohama
- akumulacija topline u prozirnim elementima je zanemarena
- gustoća toplinskog toka uslijed kratkovalnog zračenja (Sunčevo zračenje) apsorbirana u prozirnim elementima uzima se kao izvor topline u ostatku proračuna
- zona se smatra zatvorenim prostorom omeđenim građevnim elementima
- termofizikalna svojstva sastavnih materijala elemenata su vremenski neovisna, ali nije isključena zamjena komponenti tijekom vremena, na primjer pomična zasjenjenja
- pretpostavljena temperatura zračećih objekata, osim neba, koji se nalaze u okolišu jednaka je okolišnoj
- prostorna raspodjela dobitaka od Sunca jednolična je unutar zone
- distribucija mase u svim građevnim elementima je pojednostavljena
- svojstva prozora ne ovise o kutu upada Sunca, nema adsorpcije u staklu te se nakon provođenja kroz staklo dobici od Sunca predaju direktno zoni
- prosječna temperatura zračenja računa se kao po površini osrednjena pomoću površinskih temperatura elemenata
- koeficijent konvektivnog prijelaza topline vanjskih ploha ovisi o brzini i smjeru vjetera te je vremenski nepromjenjiv
- koeficijent konvektivnog prijelaza topline unutarnjih ploha ovisi o smjeru toplinskog toka te je vremenski nepromjenjiv
- koeficijent prijelaza topline dugovalnim zračenjem vanjskih ploha prema okolišu je vremenski nepromjenjiv
- odabir relevantnih dimenzija ovisan je o primjeni unutar proračuna, na primjer korisna površina poda razlikuje se od površine uzete za proračun gubitaka prema tlu

2.3.2. Period inicijalizacije

Periodu proračuna od jedne kalendarske godine prethodi period inicijalizacije čija je svrha stabilizacija temperatura u čvorovima elemenata na početku stvarnog proračunskog perioda u svrhu smanjenja greške. Preporučeni period inicijalizacije za proračune zgrada prema normi iznosi minimalno dva tjedna, što znači da na početak simulacije koja se provodi od 1. siječnja dodaje minimalno dva, posljednja, tjedna mjeseca prosinca.

2.3.3. Samopostignuta temperatura

Za provođenje proračuna potrebno je poznavati unutarnje postavne temperature za grijanje i hlađenje koje uglavnom nisu konstantne već ovise o radnom vremenu promatranog prostora. Kod većine nestambenih prostora zahtjevi za toplinskom ugodnosti mogu biti manji ili sustav može biti potpuno isključen izvan radnog vremena i vikendom, kada u prostoru ne borave ljudi. Na temelju poznate postavne temperature zone u svakom satu tijekom godine proračunava se satna potreba za grijanjem i hlađenjem. Međutim, prvi korak u proračunu je određivanje samopostignute temperature zone, odnosno temperature s pretpostavkom nekondicionirane zone u toplinskoj ravnoteži s okolišem.

Kako bi se odredilo da je li u promatranom satu potrebno grijanje, odnosno hlađenje, prvo je pretpostavljeno da je potrebna energija jednaka nuli, to jest simulira se isključenost mehaničkih sustava. Nakon provođenja proračuna dobiva se samopostignuta temperatura (*eng. freefloating, temperature*) te se njen iznos uspoređuje s postavnom temperaturom promatrane zone. Ukoliko je postignuta temperatura niža od postavne temperature za grijanje, potrebno je provesti daljnji proračun i odrediti koliko je energije potrebno predati prostoru da bi se postigla postavna temperatura. U slučaju da je samopostignuta temperatura viša od postavne za režim hlađenja, također se provodi daljnji proračun čije je rješenje iznos potrebne energije za hlađenje prostora. U trećem slučaju samopostignuta temperatura se može nalaziti između postavnih temperatura za grijanje i hlađenje, što podrazumijeva da je ostvarena tražena toplinska ugodnost te nije potrebna dodatna energija za grijanje ili hlađenje, odnosno daljnji proračun nije potreban.

2.3.4. Energijska bilanca građevnog elementa

Svaki građevni element podijeljen je na nekoliko paralelnih slojeva između kojih se nalaze čvorovi. Numeracija slojeva i čvorova provodi se od vanjske stijenke koja graniči s okolišem prema unutarnjoj koja graniči sa zrakom u zoni. Neprozirni elementi, zidovi, sastoje se od četiri sloja, odnosno pet čvorova, od kojih je prvi u doticaju s vanjskim okolišem, onda slijede tri središnja čvora, a potom peti unutarnji koji graniči sa zrakom u zoni. Prozirni

elementi, prozori, sačinjeni su od jednog sloja te imaju dva čvora, vanjski i unutarnji. Neprozirni elementi u doticaju s tlom također imaju pet čvorova, ali je prvi čvor umjesto s vanjskim zrakom u doticaju sa slojem tla te se primjenjuje poseban način proračuna. Broj jednažbi koje opisuju pojedini element jednak je broju čvorova, odnosno broju nepoznatih temperatura pridruženih svakom čvoru. Toplinska ravnoteža svakog čvora, ovisno o njegovom položaju unutar elementa, opisana je jednom od jednažbi u nastavku.

Jednažba unutarnjeg čvora, to jest kada broj plohe, i , odgovara zadnjoj plohi, n , koja graniči s unutarnjim zrakom ($pli=pln$) :

$$\begin{aligned} & -\left(h_{pli-1;eli} \cdot T_{pli-1;eli;t}\right) + \left[\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \sum_{eli}^{eln} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \right) + h_{pli-1;eli} \right] \cdot T_{pli;eli;t} \\ & - h_{ci;eli} \cdot T_{int;a;ztc;t} - \sum_{eli=1}^{eln} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;eli} \cdot T_{pli;eli;t} \right) = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot T_{pli;eli;t-1} \\ & + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1 - f_{int,c}\right) \cdot \Phi_{int;ztc;t} + \left(1 - f_{sol,c}\right) \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + \left(1 - f_{\frac{H}{C},c}\right) \cdot \Phi_{\frac{H}{C};ztc;t} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Jednažbe središnjih čvorova postoje samo kod neprozirnih građevnih elemenata, te su za sve središnje čvorove istog oblika, pri čemu se broj plohe, i , kreće od 2 do $pln-1$:

$$\begin{aligned} & -\left(h_{pli-1;eli} \cdot T_{pli-1;eli;t}\right) + \left(\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli} + h_{pli-1;eli} \right) \cdot T_{pli;eli;t} \\ & - h_{pli;eli} \cdot T_{pli+1;eli;t} = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot T_{pli;eli;t-1} \end{aligned} \quad (6)$$

Jednažba vanjskog čvora, za kojeg vrijedi $i=1$ ($pli=pl1$), a koji je u doticaju s vanjskim okolišem:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right) \cdot T_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot T_{pli+1;eli;t} \\ & = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot T_{pli;eli;t-1} + \left(h_{ce;eli} + h_{re;eli} \right) \cdot T_{e;t} \\ & + a_{sol;pli;eli} \cdot \left(I_{sol,dif;eli;t} + I_{sol,dir;eli;t} \cdot F_{sh;obst;eli;t} \right) - \Phi_{sky;eli;t} \end{aligned} \quad (7)$$

U prethodno navedenim jednažbama indeks pli označava pripadnost određenom čvoru koji opisuje pojedini element, indeks eli označava pripadnost odabranom elementu koji omeđuje zonu, dok indeks ztc označava pripadnost zoni. Indeks a pridružen je članovima koji

se odnose na zračnu masu unutar zone, a indeks t stoji uz članove koji su vremenski ovisni te se mijenjaju u svakom vremenskom koraku proračuna.

Za proračun unutarnjeg zida i pri pretpostavci toplinski izoliranih zona u obzir se uzimaju toplinska svojstva do sredine zida te se postavlja adijabatski rubni uvjet na vanjskom čvoru. Adijabatski uvjet se postiže uvrštavanjem $h_{ce;eli} = h_{re;el2} = 0$, $a_{sol;pli;eli} = 0$ i $\Phi_{sky;eli;t} = 0$ u jednadžbi (7).

2.3.5. Energijska bilanca zone

Energijska bilanca zone povezuje energijske bilance građevnih elemenata koji omeđuju zonu s bilancom zraka u zoni. U energijskoj bilanci zone sudjeluju toplinski kapacitet zone koji se sastoji od kapaciteta zraka u zoni i kapaciteta namještaja, izmjena topline ventilacijom, izmjena topline kroz toplinske mostove, izmjena topline konvekcijom s unutarnjim ploham elementa, unutarnji dobici, dobici od Sunca te izmjena topline sa sustavom grijanja i hlađenja. Energijska bilanca zone opisana je jednadžbom:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot T_{int;a;ztc;t} \\ & - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot T_{pli;eli;t}) = \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot T_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot T_{sup;vei;t}) \\ & + H_{tr;tb;ztc} \cdot T_{e;a;t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{\frac{H}{C},c} \cdot \Phi_{\frac{H}{C};ztc;t} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3.6. Dopunske jednadžbe

Termička i fizikalna svojstva građevinskih materijala pojedinih elemenata preoblikovana su za potrebe proračuna kako bi se dodijelila pojedinim čvorovima i slojevima koji čine element prema 2.3.4.

Toplinska provodnost slojeva između čvorova neprozirnih definirana je za pojedine slojeve elemenata prema:

$$\begin{aligned} h_{pl4;eli} &= h_{pl1;eli} = \frac{6}{R_{c;eli}} \\ h_{pl2;eli} &= h_{pl3;eli} = \frac{3}{R_{c;eli}} \end{aligned} \quad (9)$$

Ovisno o vrsti konstrukcije, masa neprozirnog elementa može biti koncentrirana na unutarnjoj strani, vanjskoj, u sredini građevnog elementa ili jednoliko raspodijeljena na sve slojeve koji čine element. Za slučaj mase koncentrirane na unutarnjoj strani elementa toplinski kapacitet se raspodjeljuje po slojevima prema jednadžbama:

$$\begin{aligned} \kappa_{pl5;eli} &= \kappa_{m;eli} \\ \kappa_{pl1;eli} &= \kappa_{pl2;eli} = \kappa_{pl3;eli} = \kappa_{pl4;eli} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Za građevne, neprozirne, elemente u kontaktu s tlom toplinska provodnost slojeva se raspodjeljuje po slojevima prema jednadžbama:

$$\begin{aligned} h_{pl4;eli} &= \frac{4}{R_{c;eli}} \\ h_{pl3;eli} &= \frac{2}{R_{c;eli}} \\ h_{pl2;eli} &= \frac{1}{\left(\frac{R_{c;eli}}{4} + \frac{R_{gr;eli}}{2} \right)} \\ h_{pl1;eli} &= \frac{2}{R_{gr;eli}} \end{aligned} \quad (11)$$

Pri proračunu elemenata u kontaktu s tlom vanjski koeficijenti prijelaza topline zračenjem i konvekcijom zamijenjeni su toplinskom provodnosti virtualnog sloja tla prema jednadžbi:

$$(h_{ce;eli} + h_{re;eli}) = \frac{1}{R_{gr}} \quad (12)$$

Kao i kod ostalih neprozirnih elemenata masa poda može biti koncentrirana na unutarnjoj ili vanjskoj strani, u sredini ili je jednoliko raspodijeljena. U slučaju kada je masa koncentrirana na unutarnjoj strani elementa, toplinski kapacitet raspodijeljen je po slojevima prema jednadžbi (10).

Kako se prozirni elementi sastoje samo od jednog sloja njihova toplinska provodnost određena je jednačbom:

$$h_{pl;eli} = \frac{1}{R_{c;eli}} \quad (13)$$

pri čemu se otpor prolazu topline prozora računa prema jednačbi:

$$R_c = \frac{1}{U_c} - R_{si;v} - R_{se;v} \quad (14)$$

Iz pretpostavke da nema akumulacije u prozirnim elementima slijedi jednačba za toplinski kapacitet prozirnog elementa:

$$\kappa_{pl1;eli} = \kappa_{pl2;eli} = 0 \quad (15)$$

Koeficijent prolaza topline toplinskim mostovima, sveden na jedinicu W/K, za pojedinu zonu s uključenim gubicima kroz granicu poda računa se prema jednačbi:

$$H_{tr;tb;zt} = \sum_k (I_{tb} \cdot \Psi_{tb;k}) \quad (16)$$

Koeficijent prolaza topline izmjenom zraka, sveden na jedinicu W/K, uključuje ventilaciju i infiltraciju, a za svaki vremenski korak se računa prema jednačbi:

$$H_{ve;vei;t} = \rho_a \cdot c_a \cdot q_{V;k;t} \quad (17)$$

Toplinski kapacitet unutrašnjosti kondicionirane zone uzima u obzir toplinski kapacitet zraka i namještaja koji se nalaze unutar zone. Iznos toplinskog kapaciteta unutrašnjosti nema veliki utjecaj na točnost proračuna te se računa pojednostavljeno prema jednačbi:

$$C_{int;ztc} = \kappa_{m;int;a;ztc} \cdot A_{use;ztc} \quad (18)$$

Unutarnji izvori topline mogu, ovisno o namjeni prostora, postojati uslijed metaboličkih procesa ljudi u prostoru, rada uređaja, rasvjete, prolaza vrućih cjevovoda kroz prostor, gubitaka od ugrađene opreme ili procesa koji se odvijaju unutar zone. Toplinski dobici uslijed unutarnjih izvora topline često su promjenjivi u vremenu i ovise o režimu rada te su za potrebe proračuna zadani na satnoj razini. Ukupan iznos unutarnjih dobitaka računa se prema formuli:

$$\Phi_{\text{int};ztc;t} = q_{\text{int};ztc;t} \cdot A_{\text{use};ztc} \quad (19)$$

Ukupni dobici zone od Sunca kroz sve prozirne građevne elemente zbog pojednostavljenja se uzimaju u obzir kao direktni. Faktor redukcije zasjenjenjem računa se na satnoj razini ili pojednostavljeno kao mjesečna ili sezonska konstanta. Pri proračunu faktora redukcije također je moguće uzeti u obzir i utjecaj zasjenjenja od okolnih objekata. Direktni dobici od Sunca računaju se kao:

$$\Phi_{\text{sol};ztc;t} = \sum_{wi=1}^{win} \left[g_{gl;wi;t} \cdot \left(I_{\text{sol};dif;wi;t} + I_{\text{sol};dir;wi;t} \cdot F_{\text{sh};obst;wi;t} \right) \cdot A_{wi} \cdot \left(1 - F_{fr;wi} \right) \right] \quad (20)$$

Uslijed velike razlike temperatura neba i površine elementa vanjske ovojnice zgrade dolazi do gubitka topline zračenjem, prilikom čega se izmjenjuje toplina s vanjske ovojnice, koja je više temperature, prema nebu koje je niže temperature. Pojava zračenja prema nebu uzima se u obzir pomoću jednadžbe:

$$\Phi_{\text{sky};eli;t} = F_{\text{sky};eli} \cdot h_{re;eli} \cdot \Delta T_{\text{sky};t} \quad (21)$$

2.3.7. Proračun nekondicionirane zone

Unutarnji toplinski dobici nekondicionirane zone računaju se istovjetno onima u kondicioniranoj, prema (19), dok se za dobitke od Sunca računa faktor redukcije kroz vanjske pregradne elemente nekondicionirane zone prema jednadžbi (22). Pri tome je pretpostavljeno da su svi granični elementi između kondicionirane i susjedne nekondicionirane zone jednako zasjenjeni vanjskim pregradnim elementima nekondicionirane zone.

$$F_{\text{sol};ue;ztc;t} = g_{gl;ue;ztc;t} \cdot \left(1 - F_{fr;ue;ztc;t} \right) \quad (22)$$

Dobici od Sunca nekondicionirane zone se tada računaju prema jednadžbi:

$$\Phi_{sol;ztu;t} = F_{sol;ue;ztu;t} \cdot \sum_{j(\text{opaque})} \left[a_{sol,j} \cdot A_j \cdot (I_{sol;dif;j;t} + I_{sol;dir;j;t} \cdot F_{sh;obst;j;t}) \right] \quad (23)$$

U slučaju vanjskih nekondicioniranih zona utjecaj izmjene topline transmisijom i ventilacijom te utjecaj dobitaka od Sunca susjedne nekondicionirane zone uzeti su u obzir zamjenom vanjske temperature u jednadžbi (7) s korigiranom temperaturom prema jednadžbi:

$$T_{ztu;t} = T_{int;op;ztc;t-1} - b_{ztu;m} \cdot (T_{int;op;ztc;t-1} - T_{e;t}) + \frac{\Phi_{int;ztu;t} + \Phi_{sol;ztu;t}}{H_{ztu;tot;m}} \quad (24)$$

Temperatura susjedne nekondicionirane zone ovisi o faktoru korekcije $b_{ztu;k}$ te unutarnjim i toplinskim dobicima iste, a maksimalna vrijednost koju može poprimiti definirana je jednadžbom :

$$T_{ztu;t} = \min \left(T_{e;t} + c_{ztu;h;\max} (T_{int;op;ztc;t-1} - T_{e;t}); T_{ztu;t} \right) \quad (25)$$

2.3.8. Rješavanje sustava jednadžbi

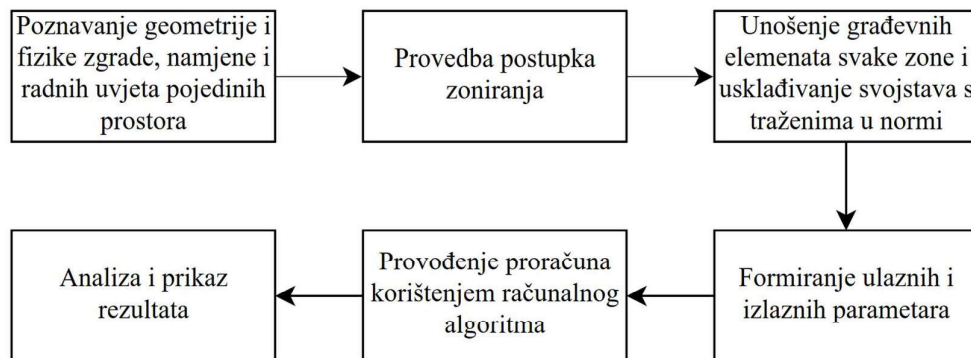
Jednadžbe kojima je opisana izmjena topline kroz građevne elemente zone i toplinska bilanca zraka u zoni, tvore kvadratnu matricu:

$$[C] \times [N] = [P] \quad (26)$$

U gornjoj jednadžbi matrica C sadrži poznate konstante, koje uglavnom predstavljaju kombinaciju fizikalnih veličina, a u jednadžbama su množene s nepoznatim temperaturama koje se nalaze u matrici nepoznanica N . Zadnja jednadžba u matrici predstavlja energijsku bilancu zraka u zoni pri čemu kada je poznata njegova temperatura, nepoznata veličina jest potrebiti toplinski tok za grijanje ili hlađenje. Na desnoj strani jednadžbe definirana je matrica poznatih veličina, matrica P , koja se sastoji od svih slobodnih članova u prethodim jednadžbama, odnosno onih koji nisu množeni s nepoznanicama. Gornja matrica (5) formira se i rješava za svaki vremenski korak, za period trajanja proračuna. Za proračun u ovom radu korišten je vremenski korak od jednog sata te period proračuna od jedne godine, što iznosi 8760 koraka. Na ovaj broj koraka potrebno je još pribrojiti i odabrani period inicijalizacije proračuna (opisan u poglavlju 2.3.2), a koji u ovom radu iznosi jedan mjesec.

3. Razvoj računalnog algoritma proračuna

U prethodnom poglavlju detaljno opisan postupak proračuna prema normi ISO EN 52016-1 moguće je raščlaniti na nekoliko cjelina kako bi se jednostavnije opisao slijed radnji koje je obuhvaća proračun. Grafički prikaz koraka koje je potrebno provesti kako bi se od odabira građevinskog objekta došlo do traženih podataka o potrebi i potrošnji energije istog, dan je algoritmom toka na Slici 2.



Slika 2. Koraci u provedbi proračuna

Prvi korak je odabir objekta za koji je potrebno imati tehničku dokumentaciju koja sadrži sve potrebne nacрте, podatke o fizikalnim svojstvima elemenata zgrade, namjeni prostora, traženim uvjetima toplinske ugodnosti, radnom vremenu i slično. Nakon toga se provodi postupak zoniranja opširno opisan u poglavlju 2.2. Nakon definiranja toplinskih zona se u razvijeni računalni algoritam unose svojstva zone i građevnih elemenata koji ju omeđuju, u obliku koji odgovara sustavu jednadžbi zadanih normom. Budući da se neke ulazne veličine (na primjer, unutarnji i dobici od Sunca te ventilacijski zahtjevi) mijenjaju u vremenu, potrebno je također generirati odgovarajući niz podataka koji će se učitavati za pojedini vremenski korak proračuna. Izlazni podaci, koji ovise o vrsti proračuna i odabranim termotehničkim sustavima, najčešće uključuju postignutu unutarnju temperaturu svake zone te potrebnu energiju za grijanje i hlađenje za svaki sat tijekom promatranog perioda. Kako bi se u sljedećem koraku proveo glavni proračun potrebno je razviti računalni algoritam koji će izvršiti sistematizaciju ulaznih parametara te izračun jednadžbi za svaki pojedini element i zonu, a prema opisu u prethodnom poglavlju. Upravo ovaj, najsloženiji korak razvoja algoritma bit će detaljnije opisan u poglavlju 3.2. Za potrebe ovog rada algoritam proračuna razvijen je pomoću općeg programskog jezika MATLAB. Nakon provedbe proračuna dobivene rezultate potrebno je analizirati i prikazati u odgovarajućem obliku, što će biti prikazano u poglavlju 5.

3.1. Primjer zadavanja matrice

Radi stjecanja boljeg uvida u problematiku postavljanja sustava jednadžbi koje opisuju zone s mnoštvom elemenata, grupiranja njihovih koeficijenata te formiranja i rješavanja matrica velikih dimenzija, u nastavku je dan primjer zadavanja matrice za slučaj zone s jednim zidom i jednim prozorom. Analizirana zona koja se sastoji dva elementa, zida i prozora te mase zraka pridružene zoni čini sustav od osam jednadžbi s osam nepoznanica. Pri tome pet jednadžbi opisuje neprozirni element (zid), dvije jednadžbe opisuju prozirni element (prozor) i jedna jednadžba opisuje energijsku bilancu zraka u zoni. Nepoznanice u navedenim jednadžbama su sedam temperatura u čvorovima elemenata i potrebna energija za grijanje, odnosno hlađenje zone. Jednadžbe od (27) do (31) opisuju element zida, jednadžbe (32) i (33) opisuju prozor, a jednadžba (34) predstavlja energijsku bilancu zone.

3.1.1. Raspisivanje jednadžbi

Jednadžba (27) odgovara jednadžbi (5) i opisuje unutarnji čvor fiktivnog zida, pri čemu $pli=pl5$, $eli=el1$ i $ztc=zt1$:

$$\begin{aligned}
 & -(h_{pl4;el1} \cdot T_{pl4;el1;t}) + \left[\frac{\kappa_{pl5;el1}}{\Delta t} + h_{ci;el1} + h_{ri;el1} \cdot \sum_{eli=1}^{el2} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \right) + h_{pl4;el1} \right] \cdot T_{pl5;el1;t} \\
 & - h_{ci;el1} \cdot T_{int;a;zt1;t} - \frac{A_{el1}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el1} \cdot T_{pl5;el1;t} - \frac{A_{el2}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el1} \cdot T_{pl2;el2;t} = \frac{\kappa_{pl5;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl5;el1;t-1} \\
 & + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1 - f_{int,c} \right) \cdot \Phi_{int;zt1;t} + \left(1 - f_{sol,c} \right) \cdot \Phi_{sol;zt1;t} + \left(1 - f_{\frac{H}{c},c} \right) \cdot \Phi_{\frac{H}{c};zt1;t} \right]
 \end{aligned} \tag{27}$$

Jednadžba (28) odgovara jednadžbi (6) i opisuje središnji čvor, pri čemu $pli=pl4$, $eli=el1$ i $ztc=zt1$:

$$\begin{aligned}
 & -(h_{pl3;el1} \cdot T_{pl3;el1;t}) + \left(\frac{\kappa_{pl4;el1}}{\Delta t} + h_{pl4;el1} + h_{pl3;el1} \right) \cdot T_{pl4;el1,t} \\
 & - h_{pl4;el1} \cdot T_{pl5;el1;t} = \frac{\kappa_{pl4;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl4;el1;t-1}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Jednadžba (29) također odgovara jednadžbi (6) te opisuje sljedeći središnji čvor, pri čemu $pli=pl3$, $eli=el1$ i $ztc=zt1$:

$$\begin{aligned} & \left(h_{pl2;el1} \cdot T_{pl2;el1;t} \right) + \left(\frac{\kappa_{pl3;el1}}{\Delta t} + h_{pl3;el1} + h_{pl2;el1} \right) \cdot T_{pl3;el1;t} \\ & - h_{pl3;el1} \cdot T_{pl4;eli;t} = \frac{\kappa_{pl3;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl3;el1;t-1} \end{aligned} \quad (29)$$

Jednadžba (30), kao i prethodne dvije, opisuje središnji čvor i odgovara jednadžbi (6), pri čemu $pli=pl2$, $eli=el1$ i $ztc=zt1$:

$$\begin{aligned} & - \left(h_{pl1;el1} \cdot T_{pl1;el1;t} \right) + \left(\frac{\kappa_{pl2;el1}}{\Delta t} + h_{pl2;el1} + h_{pl1;el1} \right) \cdot T_{pl2;el1;t} \\ & - h_{pl2;el1} \cdot T_{pl3;el1;t} = \frac{\kappa_{pl2;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl2;el1;t-1} \end{aligned} \quad (30)$$

Jednadžba (31) odgovara jednadžbi (7) i predstavlja vanjski čvor elementa, koji je u kontaktu s vanjskim okolišem, te za koji vrijedi $pli=pl1$, $eli=el1$ i $ztc=zt1$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\kappa_{pl1;el1}}{\Delta t} + h_{ce;el1} + h_{re;el1} + h_{pl1;el1} \right) \cdot T_{pl1;el1;t} - h_{pl1;el1} \cdot T_{pl2;eli;t} \\ & = \frac{\kappa_{pl1;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl1;el1;t-1} + (h_{ce;el1} + h_{re;el1}) \cdot T_{e;t} \\ & + a_{sol;pl1;el1} \cdot (I_{sol,dif;el1;t} + I_{sol,dir;el1;t} \cdot F_{sh;obst;el1;t}) - \Phi_{sky;el1;t} \end{aligned} \quad (31)$$

Jednadžba (32), koja odgovara jednadžbi (5), opisuje unutarnji čvor elementa prozora, pri čemu vrijedi $pli=pl2$, $eli=el2$ i $ztc=zt1$:

$$\begin{aligned} & - \left(h_{pl1;el2} \cdot T_{pl1;el2;t} \right) + \left[\left(\frac{\kappa_{pl2;el2}}{\Delta t} + h_{ci;el2} + h_{ci;el2} + h_{ri;el2} \cdot \sum_{eli=1}^{el2} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \right) + h_{pl1;el2} \right) \right] \cdot T_{pl2;el2;t} \\ & - h_{ci;el2} \cdot T_{int;a;zt1;t} - \frac{A_{el1}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el1} \cdot T_{pl5;el1;t} - \frac{A_{el2}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el2} \cdot T_{pl2;el2;t} = \frac{\kappa_{pl2;el2}}{\Delta t} \cdot T_{pl2;el2;t-1} \\ & + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int;zt1;t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol;zt1;t} + \left(1 - f_{\frac{H}{c},c} \right) \cdot \Phi_{\frac{H}{c};zt1;t} \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Jednadžba (33) odgovara jednadžbi (7) i predstavlja vanjski čvor elementa, koji je u kontaktu s vanjskim okolišem, za njega vrijedi $pli=pl1$, $eli=el2$ i $ztc=zt1$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\kappa_{pl1;el2}}{\Delta t} + h_{ce;el2} + h_{re;el2} + h_{pl1;el2} \right) \cdot T_{pl1;el2;t} - h_{pl1;el2} \cdot T_{pl2;eli;t} \\ & = \frac{\kappa_{pl1;el2}}{\Delta t} \cdot T_{pl1;el2;t-1} + (h_{ce;el2} + h_{re;el2}) \cdot T_{e;t} \\ & + a_{sol;pl1;el2} \cdot (I_{sol,dif;el2;t} + I_{sol,dir;el2;t} \cdot F_{sh;obst;el2;t}) - \Phi_{sky;el2;t} \end{aligned} \quad (33)$$

Jednadžba (34) odgovara jednadžbi (8) i predstavlja energijsku bilancu zone:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{int;zt1}}{\Delta t} + (A_{el1} \cdot h_{ci;el2}) + (A_{el1} \cdot h_{ci;el1}) + H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot T_{int;a;zt1;t} \\ & - A_{el1} \cdot h_{ci;el1} \cdot T_{pl5;el1;t} - A_{el1} \cdot h_{ci;el2} \cdot T_{pl2;el2;t} = \frac{C_{int;zt1}}{\Delta t} \cdot T_{int;zt1;t} + H_{ve;vei;t} \cdot T_{sup;vei;t} \\ & + H_{tr;tb;zt1} \cdot T_{e;a;t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int;zt1;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;int;zt1;t} + f_{\frac{H}{C},c} \cdot \Phi_{\frac{H}{C};zt1;t} \end{aligned} \quad (34)$$

3.1.2. Formiranje konstanti

Prethodno navedene jednadžbe potrebno je preoblikovati tako da članovi koji sadrže nepoznanice bude na lijevoj strani, a ostali desnoj strani. Potom se konstante C_1 , C_2 , ..., C_n formiraju na način da se koeficijenti koji stoje uz pojedine nepoznanice grupiraju i unose na odgovarajuće mjesto elementa u matrici C . Poznate vrijednosti s desne strane jednadžbe također se grupiraju kao P_1 , P_2 , ..., P_n te unose u pripadajuće elemente matrice P .

Za primjer zone s jednim zidom i jednim prozorom definirane su konstante iz jednadžbe (27):

$$\begin{aligned} C_1 &= -h_{pl4;el1} \\ C_2 &= \frac{\kappa_{pl5;el1}}{\Delta t} + h_{ci;el1} + h_{ri;el1} \cdot \sum_{eli=1}^{el2} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \right) + h_{pl4;el1} \\ C_3 &= -\frac{A_{el2}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el1} \\ C_4 &= -\frac{1}{A_{tot}} \cdot \left(1 - f_{\frac{H}{C},c} \right) \\ P_1 &= h_{ci;el1} \cdot T_{int;a;zt1;t} + \frac{\kappa_{pl5;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl5;el1;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int;zt1;t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol;zt1;t} \right] \end{aligned}$$

konstante iz jednadžbe (28):

$$C_5 = -h_{pl3;el1}$$

$$C_6 = \frac{\kappa_{pl4;el1}}{\Delta t} + h_{pl4;el1} + h_{pl3;el1}$$

$$C_7 = -h_{pl4;el1}$$

$$P_2 = \frac{\kappa_{pl4;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl4;el1;t-1}$$

konstante iz jednadžbe (29):

$$C_8 = -h_{pl2;el1}$$

$$C_9 = \frac{\kappa_{pl3;el1}}{\Delta t} + h_{pl3;el1} + h_{pl2;el1}$$

$$C_{10} = -h_{pl3;el1}$$

$$P_3 = \frac{\kappa_{pl3;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl3;el1;t-1}$$

konstante iz jednadžbe (30):

$$C_{11} = -h_{pl1;el1}$$

$$C_{12} = \frac{\kappa_{pl2;el1}}{\Delta t} + h_{pl2;el1} + h_{pl1;el1}$$

$$C_{13} = -h_{pl2;el1}$$

$$P_4 = \frac{\kappa_{pl2;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl2;el1;t-1}$$

konstante iz jednadžbe (31):

$$C_{14} = \frac{\kappa_{pl1;el1}}{\Delta t} + h_{ce;el1} + h_{re;el1} + h_{pl1;el1}$$

$$C_{15} = -h_{pl1;el1}$$

$$P_5 = \frac{\kappa_{pl1;el1}}{\Delta t} \cdot T_{pl1;el1;t-1} + (h_{ce;el1} + h_{re;el1}) \cdot T_{e;t} + a_{sol;pl1;el1} \cdot (I_{sol,dif;el1;t} + I_{sol,dir;el1;t} + F_{sh;obst;el1;t}) - \Phi_{sky;el1;t}$$

konstante iz jednadžbe (32)

$$C_{16} = -\frac{A_{el1}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el1}$$

$$C_{17} = -h_{pl1;el2}$$

$$C_{18} = \frac{\kappa_{pl2;el2}}{\Delta t} + h_{ci;el2} + h_{ci;el2} + h_{ri;el2} \cdot \sum_{eli=1}^{el2} \left(\frac{A_{eli}}{A_{tot}} \right) + h_{pl1;el2} - \frac{A_{el2}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;el2}$$

$$C_{19} = -\frac{1}{A_{tot}} \cdot \left(1 - f_{\frac{H}{c},c} \right)$$

$$P_6 = h_{ci;el2} \cdot T_{int;a;zt1;t} + \frac{\kappa_{pl2;el2}}{\Delta t} \cdot T_{pl2;el2;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int;zt1;t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol;zt1;t} \right]$$

konstante iz jednadžbe (33)

$$C_{20} = \frac{\kappa_{pl1;el2}}{\Delta t} + h_{ce;el2} + h_{re;el2} + h_{pl1;el2}$$

$$C_{21} = -h_{pl1;el2}$$

$$P_7 = \frac{\kappa_{pl1;el2}}{\Delta t} \cdot T_{pl1;el2;t-1} + (h_{ce;el2} + h_{re;el2}) \cdot T_{e;t} + a_{sol;pl1;el2} \cdot (I_{sol,dif;el2;t} + I_{sol,dir;el2;t} \cdot F_{sh;obst;el2;t}) - \Phi_{sky;el2;t}$$

konstante iz jednadžbe (34):

$$C_{22} = -A_{el1} \cdot h_{ci;el1}$$

$$C_{23} = -A_{el1} \cdot h_{ci;el2}$$

$$C_{24} = f_{\frac{H}{c},c}$$

$$P_8 = -\left[\frac{C_{int;zt1}}{\Delta t} + (A_{el1} \cdot h_{ci;el2}) + (A_{el1} \cdot h_{ci;el1}) + H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot T_{int;a;zt1;t} + \frac{C_{int;zt1}}{\Delta t} \cdot T_{int;zt1;t-1} + H_{ve;vei;t} \cdot T_{sup;vei;t} + H_{tr;tb;zt1} \cdot T_{e;a;t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int;zt1;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;int;zt1;t}$$

3.1.3. Formiranje matrice

Nakon formiranja konstanti potrebno je iste rasporediti u kvadratnu matricu C , formata 8×8 na odgovarajuća mjesta.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C_1 & C_2 & 0 & C_3 & C_4 \\ 0 & 0 & C_5 & C_6 & C_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_8 & C_9 & C_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & C_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{16} & C_{17} & C_{18} & C_{19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{20} & C_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{22} & 0 & C_{23} & C_{24} \end{bmatrix}$$

Poznate vrijednosti koje stoje na desnoj strani jednadžbi također se uvrštavaju u matricu, poznatih vrijednosti P , a vrijednosti koje je potrebno izračunati stoje u matrici nepoznanica N .

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} T_{pl1;el1;t} \\ T_{pl2;el1;t} \\ T_{pl3;el1;t} \\ T_{pl4;el1;t} \\ T_{pl5;el1;t} \\ T_{pl1;el2;t} \\ T_{pl2;el2;t} \\ \Phi_{H/C;ztl;t} \end{bmatrix}$$

Tada sustav jednadžbi zapisan u matričnom obliku poprima formu:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C_1 & C_2 & 0 & C_3 & C_4 \\ 0 & 0 & C_5 & C_6 & C_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_8 & C_9 & C_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & C_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{16} & C_{17} & C_{18} & C_{19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{20} & C_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{22} & 0 & C_{23} & C_{24} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{pl1;el1;t} \\ T_{pl2;el1;t} \\ T_{pl3;el1;t} \\ T_{pl4;el1;t} \\ T_{pl5;el1;t} \\ T_{pl1;el2;t} \\ T_{pl2;el2;t} \\ \Phi_{H/C;ztl;t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{bmatrix}$$

Sustav se rješava jednostavnom operacijom dijeljenja matrice P s matricom C te se tako dobivaju tražene vrijednosti u matrici nepoznanica N .

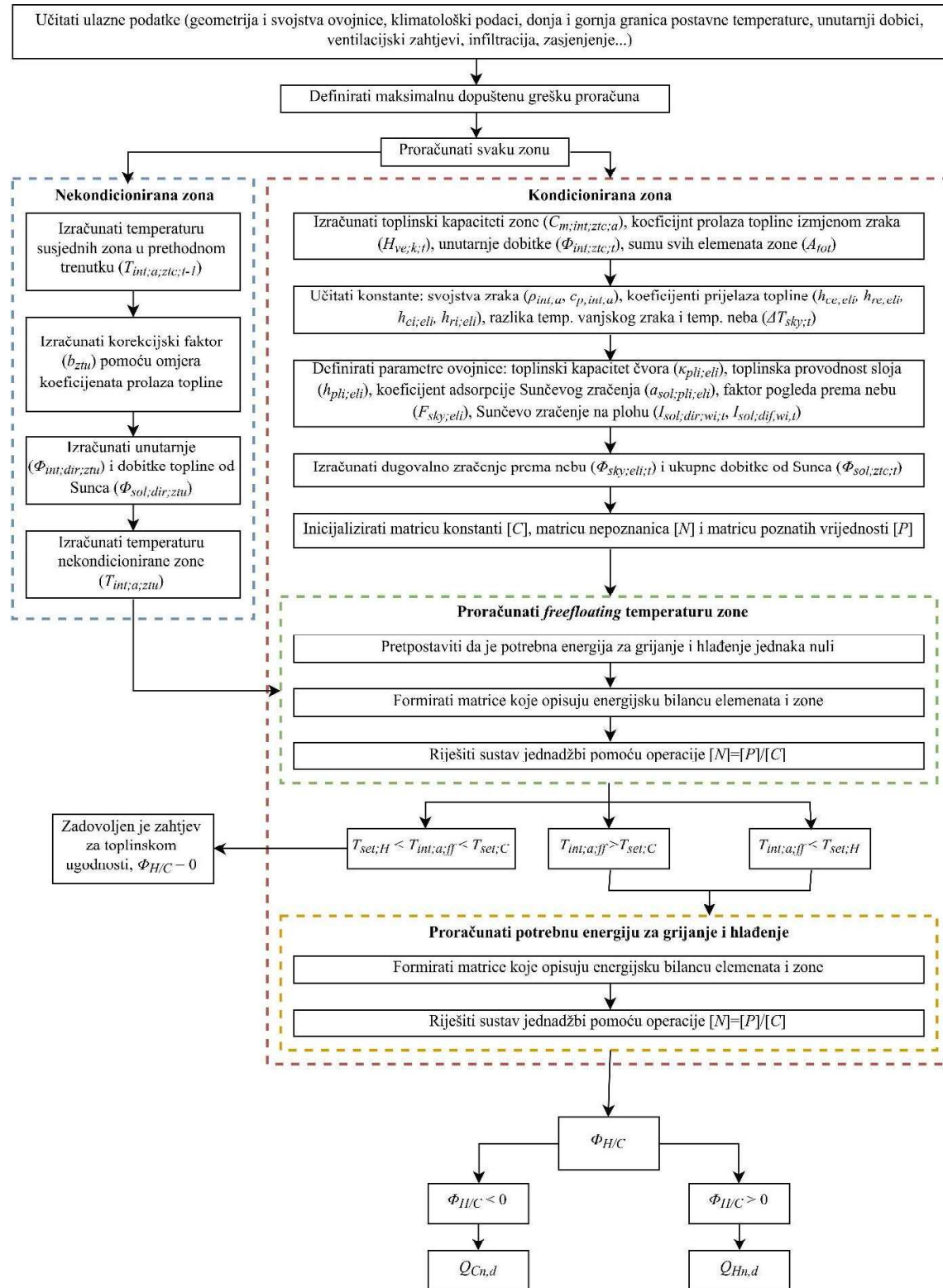
$$[N] = \frac{[P]}{[C]}$$

Kada bi se pretpostavila zona s četiri zida, od kojih svi imaju prozore, te stropom i podom, za računanje energijske bilance zone bio bi potreban sustav od trideset i devet jednadžbi s isto toliko nepoznanica. Matrice te veličine vrlo su nezgodne za ručno unošenje vrijednosti te je vjerojatnost pogreške velika. Osim toga njihovo rješavanje nije jednostavno, pogotovo u slučaju kada su potrebne iteracije kako bi se došlo do rješenja. Za rješavanje ovakvih vrsta proračuna preporučuje se stoga koristiti računalne algoritme koji mogu brzo i efikasno riješiti zadani problem.

3.2. Algoritam toka proračuna

U sklopu ovog rada, prilikom razvoja algoritma kojim je proveden proračun prema normi, usvojene su sljedeće pretpostavke: u proračunu nisu uzeti u obzir gubici prema tlu, utjecaj toplinskih mostova te utjecaj zasjenjenja. Time se, osim pojednostavljenja i skraćivanja vremena trajanja proračuna, omogućila istovjetna usporedba rezultata dobivenih proračunom prema normi s rezultatima provedene detaljne simulacije računalnim programom TRNSYS.

Postupak proračuna satne metode prema normi unesen je kao niz jednadžbi i logičkih uvjeta u obliku programskog koda u MATLAB-u. Nakon pokretanja algoritma, programska funkcija u kojoj se nalazi kod provodi proračun za svaki korak simulacije, a koji predstavlja jedan sat u godini. U svakom vremenskom koraku kod generira matricu za svaku pojedinu zonu promatranog objekta, po uzoru na primjer iz poglavlja 3.1. Na kraju svakog vremenskog koraka vrijednosti dobivene u matrici nepoznanica upisuju se u matricu rješenja. Dijagram toka razvijenog algoritma prikazan je na Slici 3.



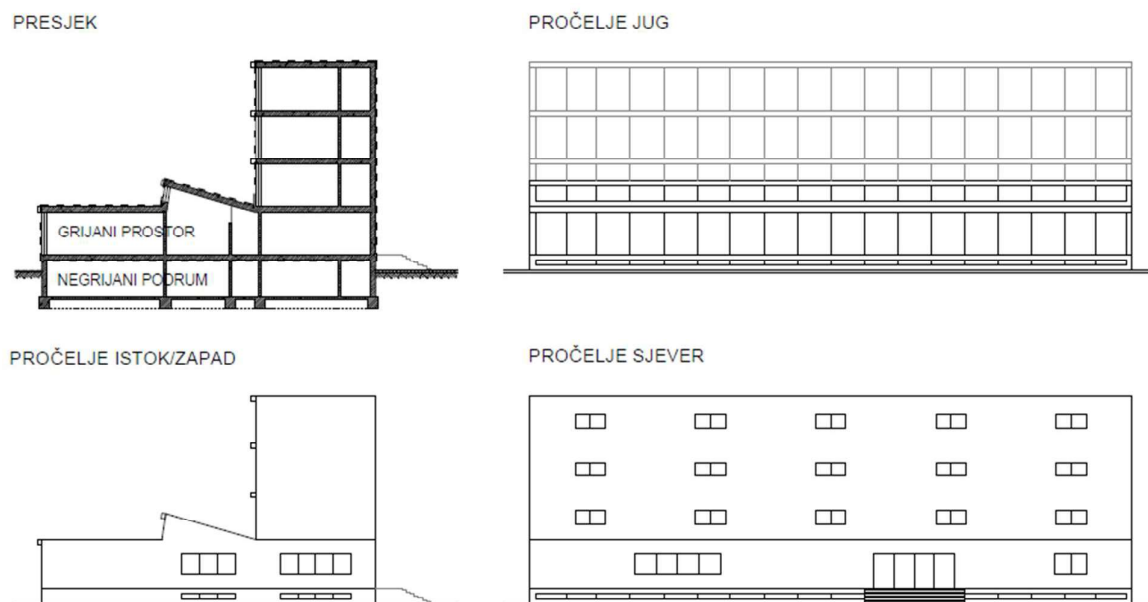
Slika 3. Algoritam toka proračuna

4. Referentna zgrada NZEB bolnice u kontinentalnoj Hrvatskoj

Usporedba razvijenog računalnog alata s programom TRNSYS provedena je na primjeru referentne zgrade bolnice gotovo nulte potrošnje energije (NZEB). Referentna zgrada je građevina definirana na način da sadrži glavne karakteristike građevina iste namjene na promatranom području. Često se koristi za analize tipskih zgrada u istraživačke svrhe, tehničke, ekonomske ili druge namjene. Odabrana referentna zgrada predstavlja tipičnu bolnicu na prostoru kontinentalne Hrvatske u kategoriji zgrada gotovo nulte potrošnje energije [4].

4.1. Geometrija i ovojnica zgrade

Bolnica se sastoji od negrijanog podruma, prizemlja u kojem se nalaze ulazni atrij sa stubištem, operacijskog i kuhinjskog bloka koji su orijentirani na sjever, bolničkih soba s južnom orijentacijom i centralnog dijela. Nad centralnim dijelom se nalazi kosi krov s prozorima orijentiranim na jug kako bi se iskoristila Sunčeva svjetlost. Preostala tri kata smještena su iznad ulaza, operacijskog i kuhinjskog bloka te se na njima također nalaze bolničke sobe južne orijentacije, dok su na svakom katu hodnici sjeverne orijentacije. Centralno stepenište proteže se od ulaza u prizemlju sve do zadnjeg kata, a južno pročelje zgrade gotovo je cijelo ostakljeno. Vanjski izgled zgrade prikazan je na Slici 4.



Slika 4. Vanjski izgled NZEB bolnice

Najznačajnija karakteristika NZEB zgrada je korištenje energetske učinkovite ovojnice, odnosno ovojnice s malim koeficijentom prolaza topline i male zrakopropusnosti, čime se nastoji smanjiti izmjena topline s okolišem. Vanjska ovojnica grijanog prostora zgrade za kojega se provodi proračun sastoji se od četiri građevna elementa: vanjskih zidova, ravnog i kosog krova iznad grijanog prostora, stropa iznad negrijanog podruma i prozora. Zidovi vanjske ovojnice sastoje se od četiri sloja čija su svojstva navedena u Tablici 1.

Tablica 1. Sastav vanjskog zida

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. topl. kapacitet	Gustoća	Topl. provodnost	Dif. otpor.
		d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]
1.	2.01 - Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26
2.	Mineralna vuna fasadne ploče s $l=0.035$	20	1030	50	0,035	0,2
3.	Polimercementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,3	1000	1100	0,7	0,6
4.	Silikatna žbuka 1,5	0,2	1050	1850	0,87	0,1

Ravni i kosi krov iznad grijanog prostora sastoje se od šest slojeva od kojih zadnji, nasipani šljunak, nije uključen u proračun. Svojstva materijala korištenih u sastavu krova dana su u Tablici 2.

Tablica 2. Sastav ravnog i kosog krova

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. topl. kapacitet	Gustoća	Topl. provodnost	Dif. otpor.
		d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]
1.	2.01 - Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26
2.	Parna brana - Al folija 0.02	0,02	880	2800	160	200
3.	Betonska podloga u nagibu	5	1000	2200	1,65	6
4.	Mineralna vuna fasadne ploče s $l=0.035$	24	1030	50	0,035	0,3
5.	5.05 - Polimerna hidroizolacijska traka na bazi PVC-P	0,2	1000	1200	0,14	200
6.	Šljunak, oblutci (*sloj ne ulazi u proračun)	6	1000	1700	0,81	0

Prilikom modeliranja zgrade negrijani prostori nisu uzeti u obzir te je za graničnu plohu koju čini pod definiran adijabatski rubni uvjet. Pod prizemnog kata, odnosno strop iznad negrijanih prostorija i negrijanog stubišta, odvaja grijani od negrijanog dijela zgrade i sastoji se od sedam različitih slojeva navedenih u Tablici 3.

Tablica 3. Sastav poda iznad negrijanog prostora

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. topl. kapacitet	Gustoća	Topl. provodnost	Dif. otpor.
		d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]
1.	Epoksi smola	0,3	1400	1200	0,2	30
2.	3.19 - Cementni estrih	6	1100	2000	1,6	3
3.	PE folija	0,02	1250	1000	0,19	0
4.	STIROPOR EPS T (elastificirani prema HRN EN 13163)	2	1260	12	0,042	0,8
5.	2.01 - Armirani beton	20	1000	2500	2,6	26
6.	Mineralna vuna fasadne ploče s $\lambda=0.035$	20	1030	50	0,035	0,2
7.	Polimercementna žbuka armirana staklenom mrežicom	0,2	1000	1100	0,7	0,4

Postoje dvije vrste unutarnjih zidova, oni koji čine granicu između zone kuhinje i zone operacijskog bloka sadrže izolacijski sloj, dok su ostali istog sastava ali bez izolacijskih slojeva (2. i 3.) navedenih u Tablici 4.

Tablica 4. Sastav unutarnjih zidova

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. topl. kapacitet	Gustoća	Topl. provodnost	Dif. otpor.
		d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]
1.	2.01 - Armirani beton	20,00	1000	2500	2,600	26,0
2.	Staklena ili kamena vuna	10,00	840	50	0,041	0,0
3.	Gipskartonske dvostruke ploče	2,50	900	900	0,250	0,0

Istovjetno unutarnjim zidovima postoje i dvije vrste međukatnih konstrukcija, one koje omeđuju zone kuhinje i operacijskog bloka sadrže izolacijske slojeve (6. i 7.), dok ostatak međukatnih konstrukcija nema izolaciju (Tablica 5.).

Tablica 5. Sastav međukatnih konstrukcija

Sloj	Materijal	Debljina	Spec. topl. kapacitet	Gustoća	Topl. provodnost	Dif. otpor.
		d [cm]	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]
1.	Epoksi smola	0,30	1400	1200	0,200	30,0
2.	PE folija	0,02	1250	1000	0,190	0,0
3.	3.19 - Cementni estrih	6,00	1100	2000	1,600	3,0
4.	STIROPOR EPS T (elastificirani prema HRN EN 13163)	2,00	1260	12	0,042	0,8
5.	2.01 - Armirani beton	20,00	1000	2500	2,600	26,0
6.	Staklena ili kamena vuna	10,00	840	50	0,041	0,0
7.	Gipskartonske jednostruke ploče	1,25	900	900	0,250	0,0

Svojstva prethodno navedenih materijala odabranu su prema [5]. Posljednji građevni dio koji čini vanjsku ovojnicu zgrade su prozori. Većina prozora se nalazi na južnom pročelju kojeg čine velike fiksne staklene stijene s udjelom ostakljenja od 88%. Materijal prozora je Low-E IZO staklo s koeficijentom prolaza topline $U=1,2$ W/m²K i stupnjem propuštanja ukupne energije Sunčeva zračenja $g=0,6$. Za potrebe proračuna odabrano je staklo sličnih svojstava, koje se može pronaći u galeriji programa TRNSYS pod imenom INS2_AR_2, čiji je koeficijent prolaza topline $U=1,27$ W/m²K i stupanj propuštanja ukupne energije Sunčevog zračenja $g=0,591$.

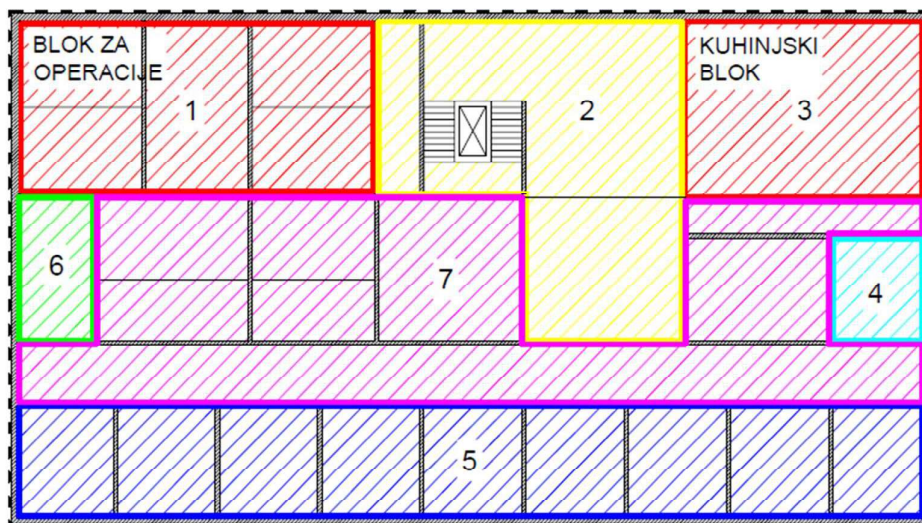
4.2. Zoniranje zgrade NZEB bolnice

Zoniranje zgrade NZEB bolnice provedeno je prema smjernicama iz poglavlja 2.2.1. Uzimajući u obzir navedene kriterije, zgrada bolnice podijeljena je u 13 toplinskih zona. Prva zona obuhvaća operacijski blok koji je odvojen od ostatka zgrade zbog posebnih zahtjeva za unutarnjom temperaturom. Drugu zonu čini ulazni atrij sa stubištem koje se proteže kroz sve katove zgrade. Ovi prostori su grupirani kao cjelina zbog velikih otvora koji ih razdjeljuju,

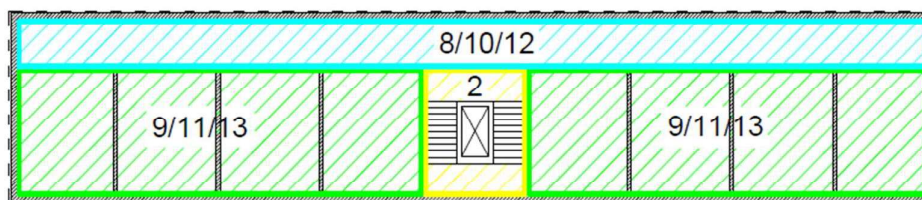
odnosno vrata za koja nije poznato koliko često su otvorena. Treća zona obuhvaća kuhinjski blok koji ima drugačije radno vrijeme od ostatka zgrade. Četvrta i šesta zona su zbog suprotno orijentiranih ostakljenih površina odvojene od sedme zone koja obuhvaća centralni prostor zgrade te ima prozore samo na južnoj strani. Petu zonu čine južno orijentirane sobe u prizemlju. Prostor hodnika na prvom katu čini zonu osam, a hodnik na drugom katu zonu deset, dok je hodnik na zadnjem katu odvojen kao zona jedanaest zbog utjecaja krova. Sobe na prvom katu čine zonu devet, one na drugom katu zonu jedanaest, a sobe na zadnjem, trećem katu su posebna trinaesta zona zbog rubnog položaja uz krov. Tablični prikaz formiranih zona, njihovog režima rada, postavnih temperatura i pripadajuće korisne površine dan je Tablicom 6., a zoniranje zgrade bolnice prikazano je na Slici 5. i Slici 6.

Tablica 6. Podjela zgrade na zone i svojstva zona

Broj zone	Opis	Radno vrijeme	Postavna temperatura za grijanje [°C]	Postavna temperatura za hlađenje [°C]	Korisna površina poda [m ²]
1.	Operacijski blok	24/7	24	26	146,16
2.	Ulazni atrij sa stubištem	24/7	22	26	179,40
3.	Kuhinjski blok	15/7	22	28	99,76
4.	Soba u prizemlju s velikim otvorom prema istoku	24/7	22	26	22
5.	Bolničke sobe u prizemlju	24/7	22	26	238,68
6.	Soba u prizemlju s velikim otvorom prema zapadu	24/7	22	26	25,20
7.	Centralni dio prizemlja	24/7	22	26	327,08
8.	Hodnik na prvom katu	24/7	22	26	97,24
9.	Bolničke sobe na prvom katu	24/7	22	26	234
10.	Hodnik na drugom katu	24/7	22	26	97,24
11.	Bolničke sobe na drugom katu	24/7	22	26	234
12.	Hodnik posljednjeg kata	24/7	22	26	97,24
13.	Bolničke sobe posljednjeg kata	24/7	22	26	234



Slika 5. Podjela na zone prizemlje



Slika 6. Podjela na zone referentni kat

4.3. Model zgrade

Prije provođenja proračuna prema normi i simulacije pomoću programa TRNSYS izrađen je model zgrade prema podacima poznatim iz nacrti i elaborata fizike zgrade. Prilikom modeliranja zgrade za potrebe simulacije korišteno je TRNSYS-ovo korisničko sučelje TRNBuild, koje omogućava relativno jednostavno i sistematizirano unošenje geometrije, orijentacije, sastava i svojstva elemenata [6]. Pomoću dodatka TRNBuild definiraju se i traženi ulazni parametri kao što su ventilacijski zahtjevi, unutarnji dobici te postavne temperature. Za potrebe proračuna putem algoritma geometrija i sastav građevnih elemenata zgrade uneseni su odvojeno od ostatka proračuna te su kasnije učitani pomoću naredbe prilikom pokretanja programskog koda proračuna. Ostale ulazne parametre bilo je također potrebno oblikovati u odgovarajući oblik, u ovom slučaju je to bila matrica podataka s vrijednostima za svaki sat i svaku zonu iz koje je program učitavao vrijednosti.

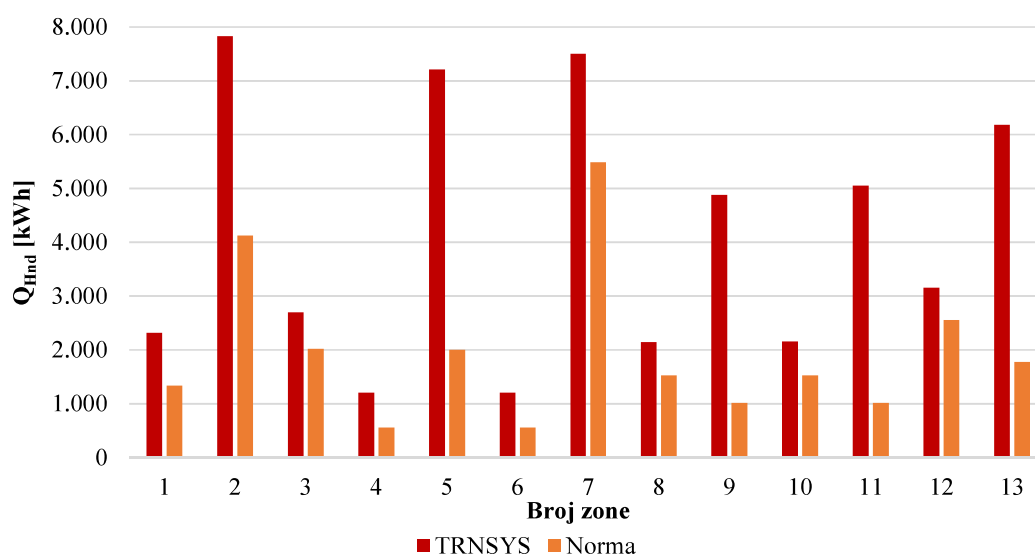
Raspored rada i postavnih temperatura dan je u prethodnom poglavlju, Tablica 6., dok su u svim zonama zgrade pretpostavljeni prosječni unutarnji toplinski dobici od ljudi i rasvjete u iznosu od $16,51 \text{ W/m}^2$, svedeni na korisnu površinu poda [4]. U oba modela unutarnji dobici su, pretpostavljeni kao 60% zračenje i 40% konvekcija, a toplinski dobici od Sunca kao 90% zračenje i 10% konvekcija. Pretpostavljena je infiltracija od 0,7 izmjena na sat u svim prostorijama koje imaju prozore, a mehanička ventilacija nije uzeta u obzir [4]. Udio okvira u ostakljenju je zanemaren u oba slučaja te je pretpostavljeno da nema zasjenjenja. U iznosu unutarnjeg toplinskog kapaciteta zone u slučaju simulacije sudjeluje samo zračna masa sadržana u volumenu zone i unutarnji se kapacitet sam računa u programu TRNBuild. Kod proračuna putem algoritma unutarnji toplinski kapacitet zone uključuje i kapacitet namještaja te iznosi $10000 \text{ J/(m}^2\text{K)}$ sveden na korisnu površinu poda.

Prilikom oba proračuna korišteni su meteorološki podaci za tipičnu godinu za grad Zagreb definirani od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda. Period simulacije uzet u obzir prilikom analize rezultata je jedna godina, odnosno 8760 sati. Pri tome je jedina je razlika između norme i simulacije u TRNSYS-u to što proračun prema normi sadrži i period inicijalizacije od 744 sata (mjesec dana).

5. Analiza rezultata

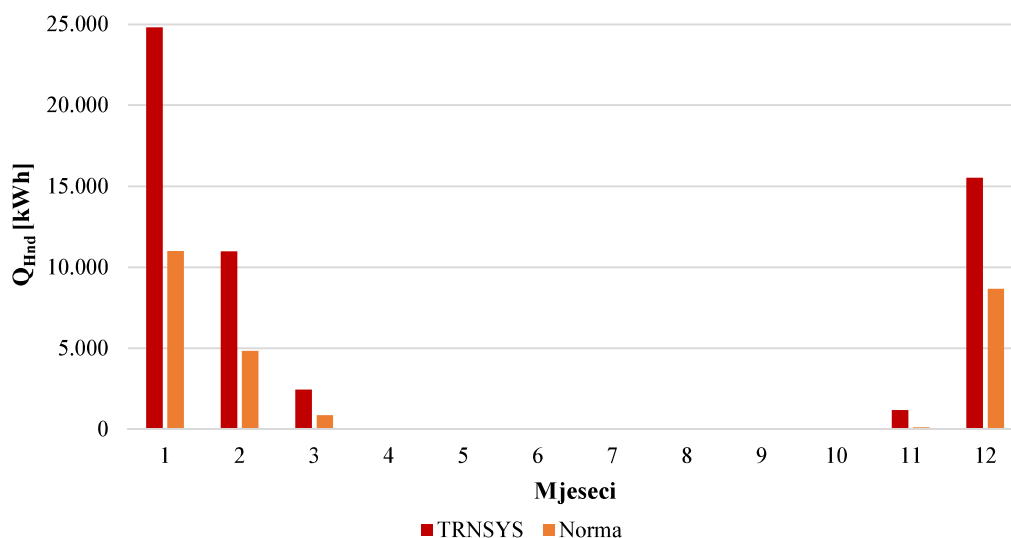
5.1. Usporedba proračuna prema normi i simulacije u programu TRNSYS

Rezultati dobiveni proračunom prema normi uspoređeni su s rezultatima dobivenima detaljnom računalnom simulacijom u TRNSYS-u. U oba slučaja promatrana je potrebna energija za grijanje i hlađenje po zonama, kao i ukupna potreba za cijelu zgradu. Proračuni su provedeni na satnoj razini za period od jedne tipične meteorološke godine u gradu Zagrebu. Usporedba je provedena na primjeru referentne zgrade NZEB bolnice opisane u poglavlju 4. Godišnja potreba za toplinskom energijom za svaku zonu prikazana je na Slici 7.



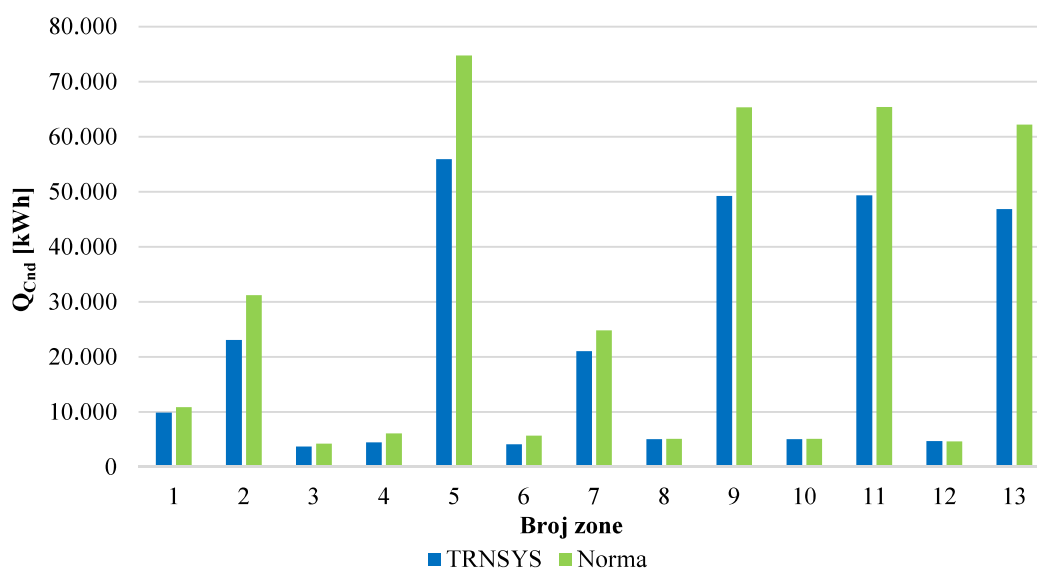
Slika 7. Godišnja potreba za grijanjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

Godišnja potreba za grijanjem po mjesecima dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a prikazana je na Slici 8. Potreba za energijom za grijanje po mjesecima prisutna je u mjesecima studenome, prosincu, siječnju, veljači i ožujku, s time da su potrebe u ožujku i studenome zanemarive u odnosu na ostale mjesece jer se na njih odnosi oko 5% ukupne godišnje energije. Iz grafičkog prikaza je vidljivo iznimno veliko odstupanje u rezultatima dobivenim proračunom prema normi i detaljnom računalnom simulacijom, pri čemu ukupna godišnja energija za grijanje zgrade NZEB bolnice prilikom provedbe proračuna prema normi iznosi 25.487 kWh, što je 47,6% potrebne energije izračunate simulacijom u programu TRNSYS.



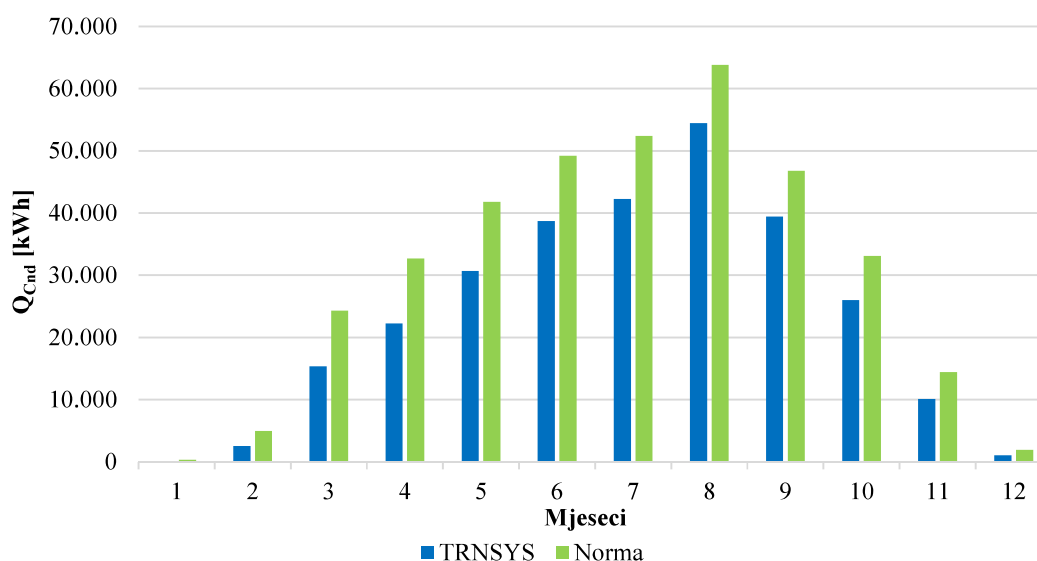
Slika 8. Godišnja potreba za grijanjem po mjesecima dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

Prikaz godišnje potrebe za hlađenjem raspodijeljene po zonama, Slika 9., ukazuje na gotovo neznatna odstupanja među rezultatima u zonama 1, 3, 8, 10 i 12, što se može povezati s time da su ostakljenja u tim zonama orijentirana sjeverno te su dobici od Sunca minimalni. Odstupanja u navedenim zonama ne prelaze 15%, dok su zonama 4 i 6 zamijećena veća odstupanja od oko 35%, no njihov je apsolutni iznos mali te značajno ne utječe na ukupnu energijsku potrebu zgrade. Uzrok veće relativne potrebe za hlađenjem u sobama 4 i 6 je orijentiranost ostakljenja na istok i zapad gdje je osunčanost veća nego na sjeveru. Preostale zone 2, 5, 7, 9, 11 i 13 sve imaju dominantna ostakljenja na južnoj strani te njihove povećane potrebe za rashladnom energijom u odnosu na one izračunate simulacijom također ukazuju na nepreciznost matematičkog modela norme kada su u pitanju prozirni elementi s izrazitim dobicima od Sunca. Najveće relativno odstupanje pojavljuje se u zoni 6 i iznosi 38,5%, a prosječna pogreška po zoni iznosi 21,9%.



Slika 9. Godišnja potreba za hlađenjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

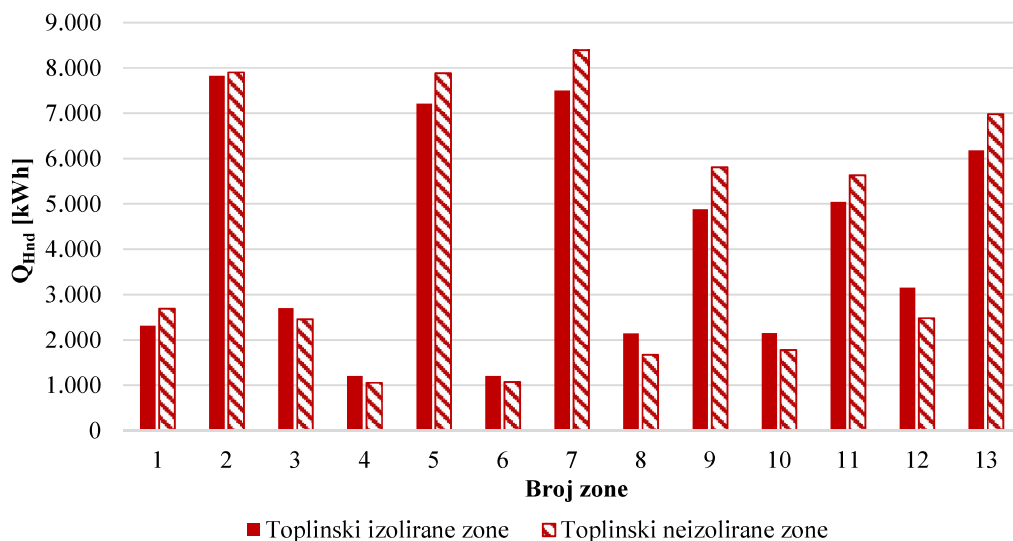
Slika 10. prikazuje raspodjelu potrebne energije za hlađenje po mjesecima. Grafički prikaz, ako zanemarimo mjesece siječanj, veljaču i prosinac, ukazuje na gotovo jednaku apsolutnu razliku između rezultata dobivenih simulacijom i onih izračunatih prema normi za sve mjesece. Ukupna godišnja energija potrebna za hlađenje bolnice je 29,4% veća kada se provodi proračun putem norme i iznosi 365.725 kWh.



Slika 10. Godišnja potreba za hlađenjem po mjesecima dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

5.2. Usporedba rezultata za toplinski međusobno izolirane i neizolirane zone

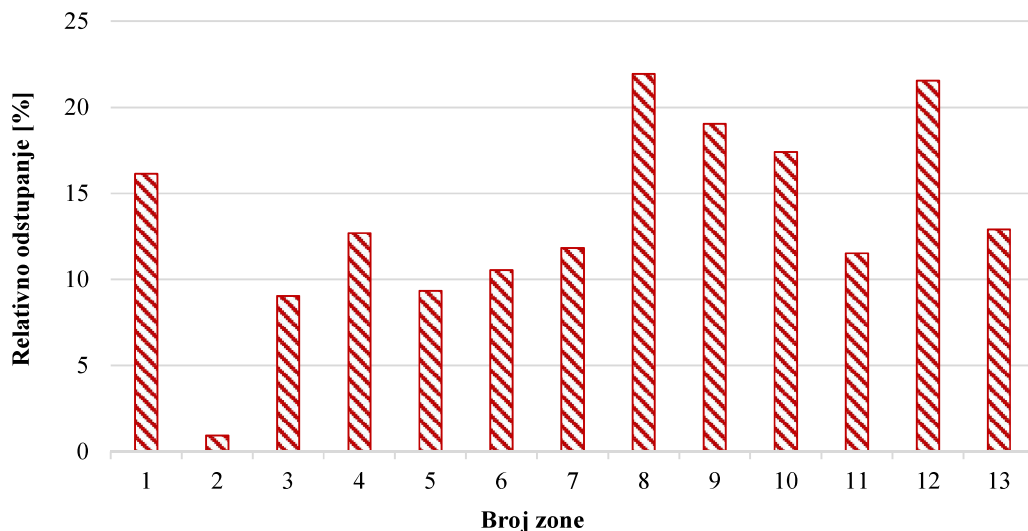
Jedna od glavnih pretpostavki proračuna provedenog pomoću norme je toplinska izoliranost zona, što podrazumijeva da je izmjena topline kroz elemente koji čine granicu između zona zanemariva. U slučaju kada bi zgrada sadržavala nekondicionirane zone, izmjena topline sa susjednim kondicioniranim zonama morala bi se uzeti u obzir, što ovdje nije slučaj. Godišnja potreba za toplinskom energijom za svaku zonu prikazana je na Slici 15. Prvi korak u analizi točnosti rezultata je bila provjera navedene pretpostavke. Provjera je izvršena korištenjem TRNSYS-a na način da su provedene dvije simulacije. U prvoj simulaciji zone su toplinski izolirane te je za zidove koji ih dijele postavljen adijabatski rubni uvijet u sredini zida, u programu modeliran vrstom zida *boundary identical*. Druga simulacija vjernije prikazuje stvarno termodinamičko ponašanje građevine te uzima u obzir izmjenu topline kroz granične elemente zona, prilikom čega su zajednički zidovi modelirani vrstom zida *adjacent*. Godišnja potreba za grijanje u oba slučaja prikazana je Slikom 11.



Slika 11. Godišnja potreba za grijanjem po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona

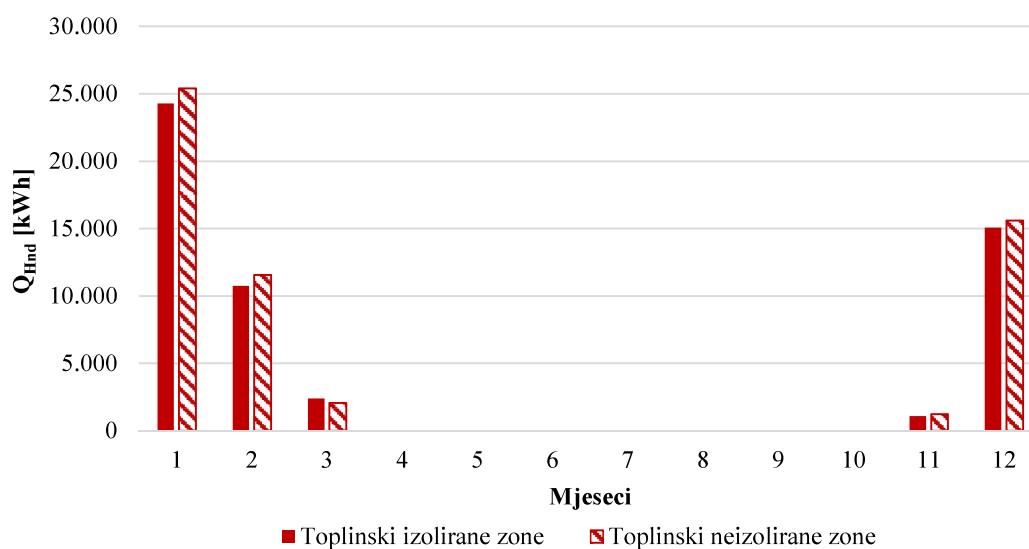
Prema Slici 11. vidljivo je da zone 2, 5, 7, 9, 11 i 13 imaju znatno veću apsolutnu potrebu za grijanjem od ostalih zona zbog većeg volumena, ali i zbog ostakljenja s obzirom da staklene stijene imaju veći koeficijent prolaza topline od zidova pa su kroz njih gubici veći. Kada su zone toplinski neizolirane raste potreba za grijanjem u navedenim zonama, a istovremeno pada u njima susjednim zonama koje imaju manju površinu ostakljenja. Iznimka je zona 1, kojoj raste potreba za grijanjem zbog više postavne temperature od ostatka zgrada pa su njeni gubici

prema susjednim zonama veći kada se omogući prolaz topline kroz unutarnje zidove. Također se može primijetiti kako niti jedna zona nema većih apsolutnih odstupanja, a najveće relativno odstupanje ima zona 8 te ono iznosi 21,9%, relativna odstupanja po zonama prikazana su na Slici 12. Relativno odstupanje pri tome je definirano kao omjer razlike u iznosima potrebne energije i apsolutnog iznosa u slučaju izoliranih zona. Prosječno odstupanje po zoni dobiveno metodom srednje kvadratne pogreške iznosi 13,4%.

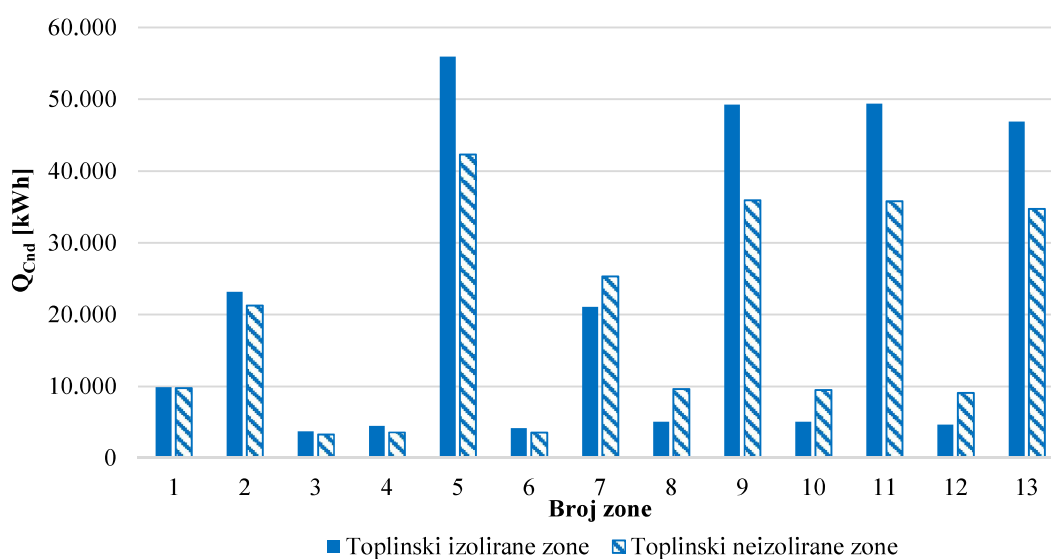


Slika 12. Relativno odstupanje grijanja po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona

Raspodjela godišnje potrebe za grijanjem, prikazana na Slici 13., prikazuje kako potreba za grijanjem postoji u mjesecima studenome, prosincu, siječnju, veljači i ožujku, dok je iznos potrebne energije u ožujku i studenome gotovo zanemariv. Uzrok maloj potrebi za grijanjem u prijelaznim mjesecima je dobra izoliranost građevine, što dovodi do porasta potrebne energije za hlađenje, kao što je pokazano u nastavku. Prilikom provođenja simulacije s pretpostavkom da između zona nema izmjene topline ukupna godišnja potreba za grijanjem iznosila je 53.538 kWh. Kada je simulacija provedena s pretpostavkom da su zone toplinski neizolirane ukupna godišnja potreba za grijanjem iznosila je 55.804 kWh, što predstavlja porast od 4%.



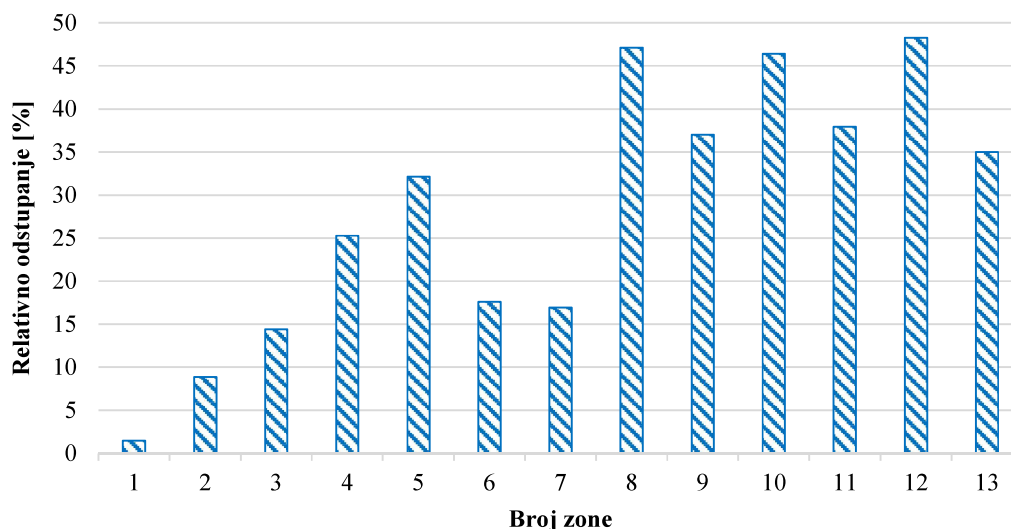
Slika 13. Godišnja potreba za grijanjem po mjesecima prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona



Slika 14. Godišnja potreba za hlađenjem po zonama prilikom usporedbe toplinski izoliranih zona

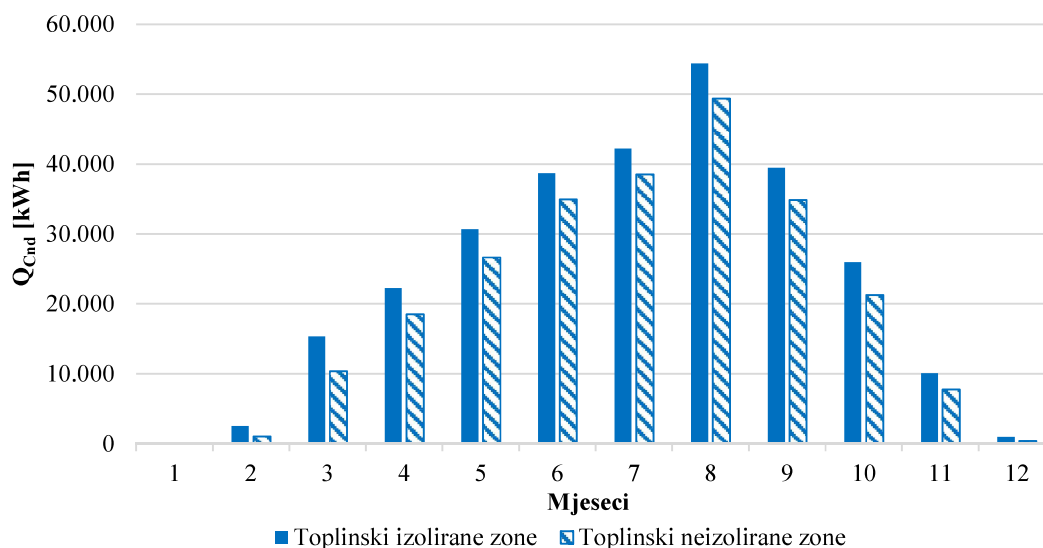
Slika 14. prikazuje godišnju potrebu za hlađenjem za svaku od zona te se iz rezultata mogu zamijetiti velike potrebe za hlađenjem u zonama 5, 9, 11 i 13. Ovakav rezultat je očekivan s obzirom da navedene zone imaju izrazito veliku ostakljenost (88%) koja uzrokuje značajne dobitke topline od Sunca. Potreba za hlađenjem u tim zonama se smanjuje kada se zone modeliraju kao toplinski neizolirane. Uzrok tome je preraspodjela velikih dobitaka od Sunca zona okrenutih na jug transmisijom kroz pregradne elemente prema njima susjednim zonama

7, 8, 10 i 12. Relativna odstupanja za sve zone, definirana kao omjer razlike u iznosima potrebne energije i apsolutnog iznosa u slučaju izoliranih zona, prikazana su na Slici 15. Najveće relativno odstupanje pojavljuje se u zoni 12 i iznosi 48,3%, dok je prosječno odstupanje po zoni dobiveno metodom srednje kvadratne pogreške 28,3%.



Slika 15. Relativno odstupanje hlađenja po zonama prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona

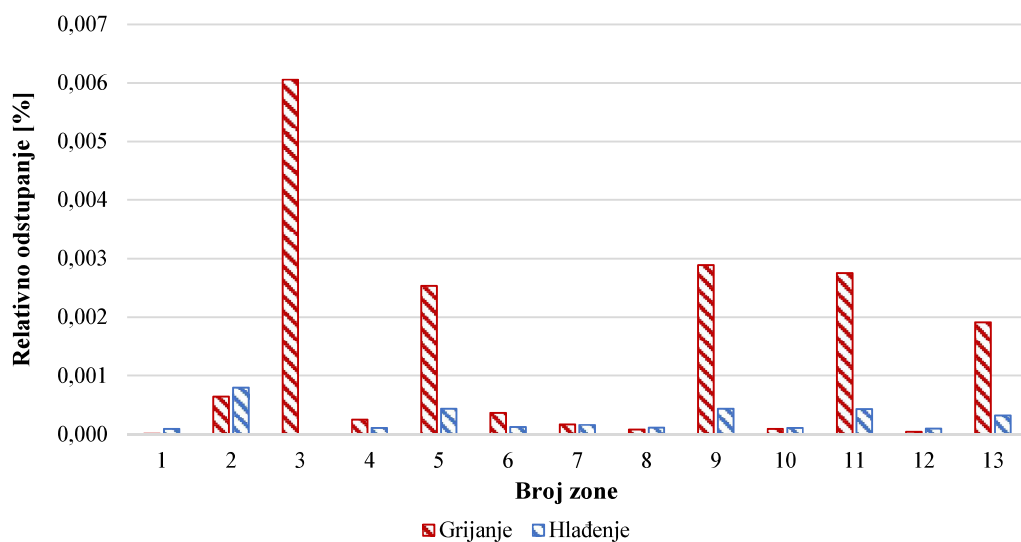
Iz Slike 16., koja prikazuje mjesečnu raspodjelu potrebe za hlađenjem cijele zgrade, vidljiva je potreba za hlađenjem tijekom cijele godine, iako je u siječnju, veljači i prosincu ona zanemariva. Uzrok velikoj potrebi za rashladnom energijom je dobra izoliranost ovojnice zgrade, to jest korištenje materijala s velikim otporom prolazu topline. Ovakva izolacija uvelike smanjuje potrebu za grijanjem u zimskim mjesecima jer umanjuje toplinske gubitke prema okolišu, no jednako tako ne dozvoljava da se višak topline, koji nastaje uslijed unutarnjih i dobitaka od Sunca, izmijeni s okolišem. Također, vidljivo je da je ukupna energija potrebna za hlađenje u svakom mjesecu manja kada su zone toplinski neizolirane. Prilikom provođenja simulacije s pretpostavkom da između zona nema izmjene topline ukupna godišnja potreba za hlađenjem iznosila je 282.683 kWh, a kada je simulacija provedena s pretpostavkom da su zone toplinski neizolirane ukupna godišnja potreba za hlađenjem iznosila je 243.611 kWh, odnosno 16% manje.



Slika 16. Godišnja potreba za hlađenjem po mjesecima prilikom usporedbe toplinske izoliranosti zona

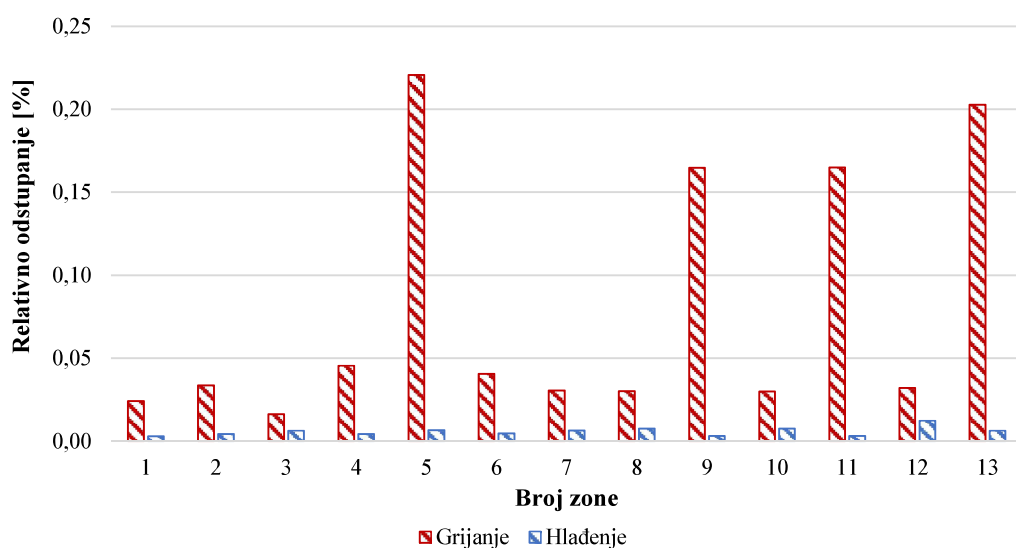
5.3. Analiza utjecaja toplinskog kapaciteta zone i elemenata ovojnice na točnost modela

U sklopu provjere pretpostavki preporučenih normom provedena je i analiza u kojoj se provjerava ispravnost pretpostavke da prema normi, unutarnji toplinski kapacitet zone iznosi $10000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K})$, svedeno na površinu poda. Pri tome unutarnji kapacitet u obzir uzima kapacitet zračne mase u zoni i kapacitet namještaja. S druge strane, model višezonske zgrade u programu TRNSYS računa toplinski kapacitet prema volumenu zone te uzima u obzir samo kapacitet zračne mase. Ispravnost pretpostavke iz norme analizirana je provođenjem dodatnih simulacija u TRNSYS-u. U prvom slučaju korišten je preporučeni toplinski kapacitet prema normi, dok je u drugom slučaju korišten originalni TRNSYS model koji u obzir uzima samo toplinski kapacitet zraka u zoni (u nekim slučajevima višestruko manji od onog preporučenog normom). Usporedba rezultata pokazala da za dva analizirana slučaja ukupna godišnja potreba za grijanjem i hlađenjem odstupa manje od 0,001%, iz čega se može zaključiti da unutarnji toplinski kapacitet zone nema veliki utjecaj na točnost rezultata proračuna za analiziranu zgradu. Na Slici 17. je prikazano relativno odstupanje potrebe za grijanjem i hlađenjem nakon promjene unutarnjeg kapaciteta. Relativno odstupanje pri tome je definirano kao omjer razlike potrebne energije i apsolutnog iznosa u slučaju kada je korišten prvobitni TRNSYS model.



Slika 17. Relativno odstupanje potrebe za grijanjem i hlađenjem pri promjeni unutarnjeg kapaciteta

Druga provjera se odnosila na pretpostavku o toplinskom kapacitetu konstrukcije. Naime, prema normi su klase masivnosti konstrukcije raspoređene u tablicu [1] u pet kategorija, od lake do vrlo teške konstrukcije, s definiranim toplinskim kapacitetom za svaku od kategorija. Prema tablici promatrana zgrada bolnice pripada kategoriji vrlo teške konstrukcije s toplinskim kapacitetom zidova od $250.000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K})$. Međutim, stvarni toplinski kapacitet konstrukcije na temelju detaljnog izračuna kapaciteta pojedinih slojeva iznosi za neke elemente i dvostruko više.

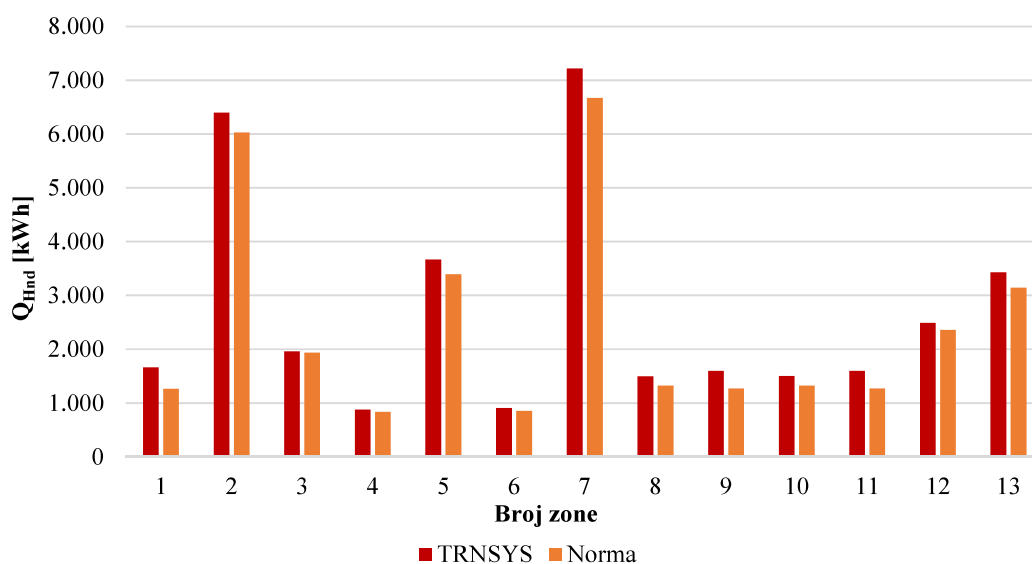


Slika 18. Relativno odstupanje potrebe za grijanjem i hlađenjem nakon promjene kapaciteta zidova

Usporedba rezultata simulacije provedena proračunom prema normi pokazuje da greška koja nastaje pojednostavljenjem proračuna, odnosno uvrštavanjem pretpostavljenih vrijednosti iz tablice, iznosi 6,8% pri proračunu potrebne energije za grijanje i 0,5% pri proračunu potrebne energije za hlađenje. Relativno odstupanje potrebne energije za grijanje i hlađenje u zonama nakon promjene kapaciteta zidova prikazano je Slikom 18. Pri tome je relativno odstupanje definirano kao omjer razlike potrebne energije i apsolutnog iznosa u slučaju kada je korišten model s točnim iznosima toplinskih kapaciteta zidova.

5.4. Analiza utjecaja dobitaka od Sunca kroz prozirne elemente na točnost modela

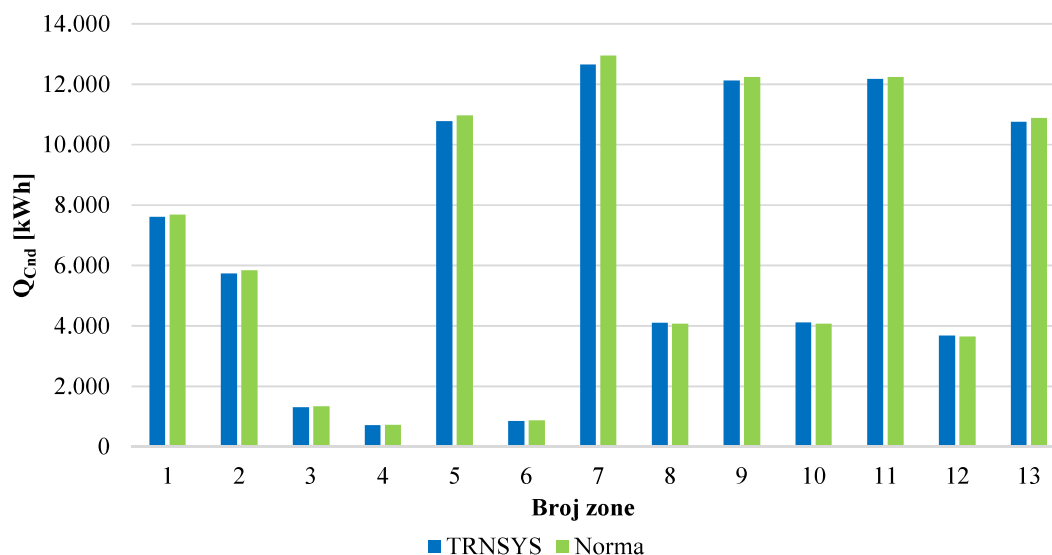
Budući da je prilikom analize rezultata u poglavlju 5.1. uočeno veliko odstupanje rezultata u zonama koje imaju velike staklene površine, a time i dominante dobitke od Sunca, provedena je i usporedba s pretpostavkom da su svi prozirni elementi na zgradi zamijenjeni neprozirnim.



Slika 19. Godišnja potreba za grijanjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

Iz rezultata na Slici 19., koji prikazuju godišnju potrebu za grijanjem po zonama kada ne postoje prozirni elementi, može se zaključiti o ispravnosti pretpostavke da model korišten u normi pokazuje velike razlike u dijelu opisa izmjene topline kroz prozirne elemente. Kada se uklone prozirni elementi iz ovojnice zgrade, najveće odstupanje po zoni iznosi 23,8% u zoni 1, dok u ostalim zonama odstupanje ne prelazi 20%. Prosječno odstupanje po zonama izračunato metodom srednje kvadratne pogreške iznosi 10,3%. Godišnja potrebna energija za grijanje

objekta bolnice bez prozora izračunata simulacijom iznosi 34.818 kWh, a ona proračunata prema normi manja je za 8,9% i iznosi 31.693 kWh.



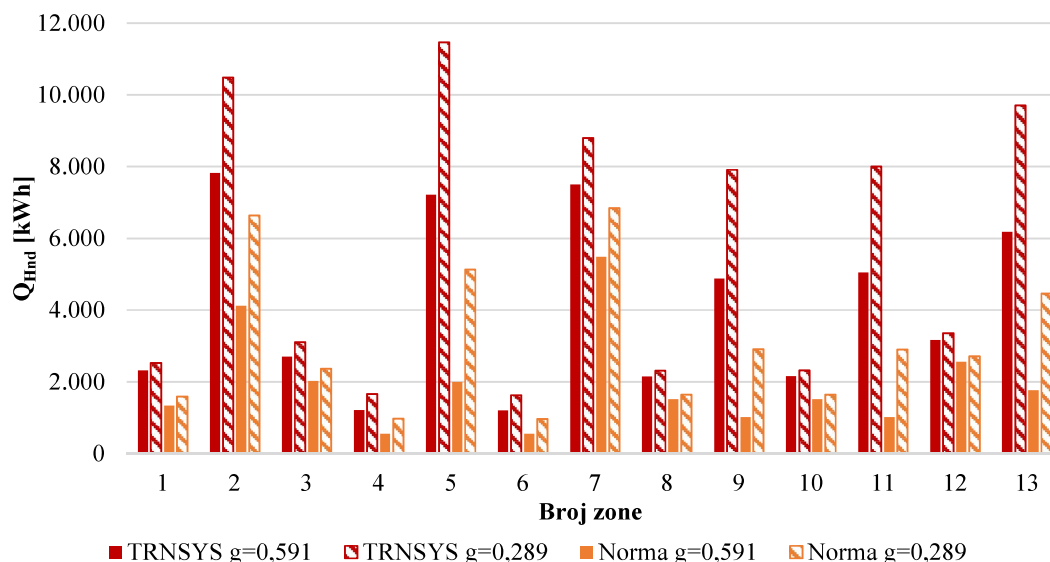
Slika 20. Godišnja potreba za hlađenjem po zonama dobivena usporedbom rezultata norme i TRNSYS-a

Rezultati dobiveni prilikom proračuna potrebe za hlađenjem (Slika 20.) također potvrđuju odstupanje modela u dijelu koji opisuje utjecaj dobitaka od Sunca kroz prozirne elemente. Naime, usporedba rezultata pokazuje da potrebna energija za hlađenje ne odstupa niti u jednoj zoni više od 3,1%, koji se manifestiraju u zoni 6. Prosječno odstupanje svih zona izračunato metodom srednje kvadratne pogreške iznosi 1,6%. Potreba za hlađenjem za period od jedne godine izračunata simulacijom iznosi 86.628 kWh, a kada se proračun provodi prema normi potrebna energija za hlađenje iznosi 87.573 kWh, odnosno 1,1% više.

5.5. Analiza utjecaja promjene svojstava prozirnih elemenata na točnost modela

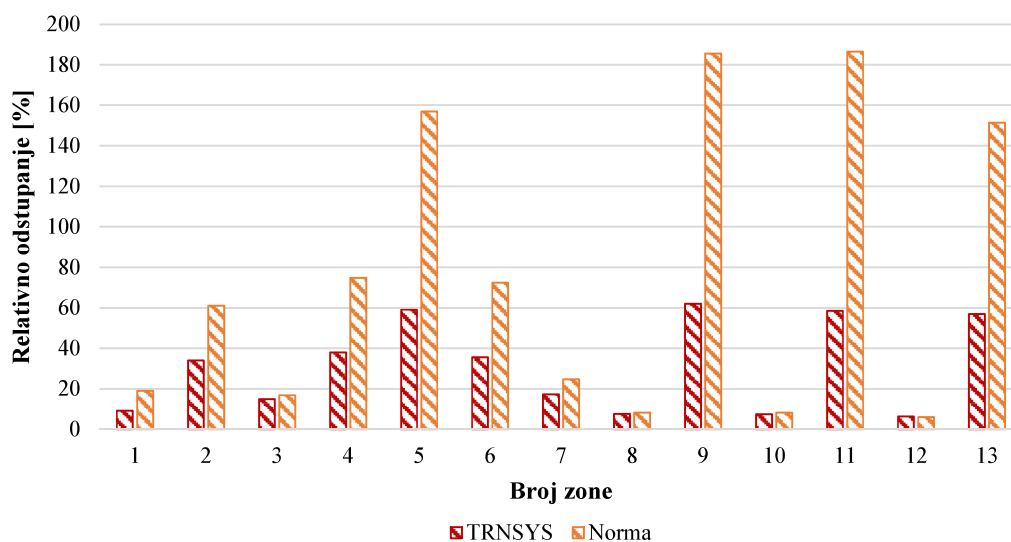
Nakon potvrde odstupanja prilikom proračuna prozirnih elemenata provedene su dodatne analize u svrhu dublje analize problema. Cilj je bio provjeriti utjecaj svojstva prozirnih elemenata na promjenu utjecaja dobitaka od Sunca na energijsku bilancu zone, a samim time i na potrebu za toplinskom i rashladnom energijom. Svojstva prozirnih elemenata izmijenjena su s početne vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja $g=0,591$ na $g=0,289$, pri čemu je koeficijent prolaza topline prozora zadržan približno sličnim ($U=1,27$ W/m²K za početni

model, $U=1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ za izmijenjeni model). Razlike u potrebnoj energiji za grijanje koje su rezultat uvedene promjene prikazane su na Slici 21.

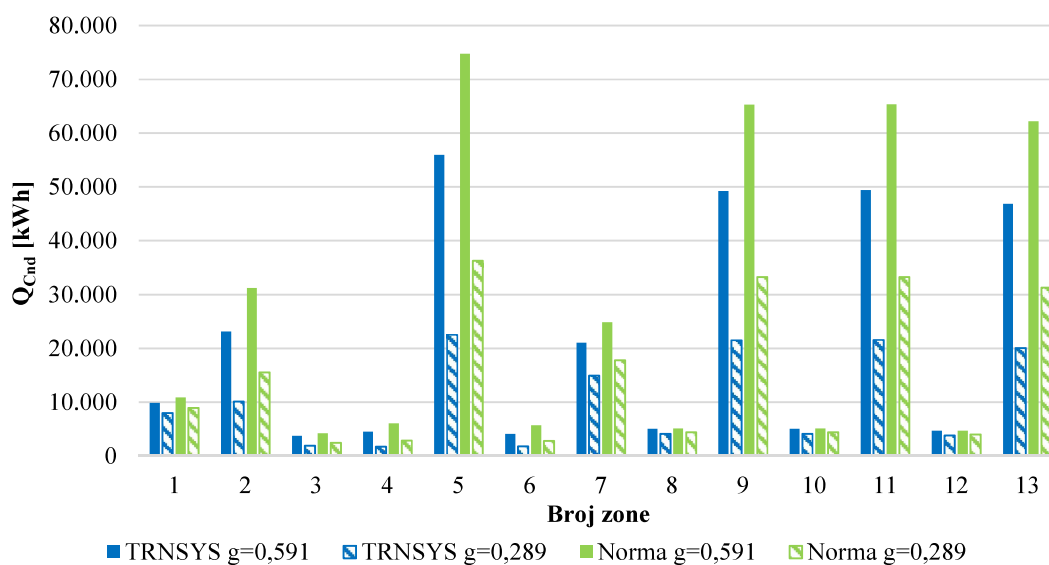


Slika 21. Godišnja potreba za grijanjem po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata

Smanjenjem iznosa faktora g , na gotovo polovinu početnog, uočljivo je da i prilikom proračuna normom i kod simulacije potreba za grijanjem raste. Također primjećuje se, kao i u prethodnim proračunima i simulacijama, veći porast u zonama 2, 5, 7, 9, 11 i 13 koje imaju velika i južno orijentirana ostakljenja. Razlika u porastu potrebne energije svake zone kod provođenja simulacije u apsolutnom je iznosu gotovo jednaka porastu potrebne energije kada se proračun provodi prema normi, što pokazuje neproporcionalno povećanje potreba s obzirom na njihov relativni iznos. Na primjer, u zoni 2 razlika prilikom zamjene svojstava stakla, u slučaju da se proračun provodi simulacijom, iznosi 2.656 kWh, što predstavlja porast od 33,9%. Kada se proračun provodi prema normi, razlika iznosi 2.510 kWh, što predstavlja porast od 60,1%. Relativna odstupanja u potrebi za grijanjem prilikom izmjene svojstava prozirnih elemenata prikazana je Slikom 22. za sve zone. Pri čemu je relativno odstupanje definirano kao omjer razlike potrebne energije u odnosu na apsolutni iznos za početni slučaj. Za slučaj stakla s faktorom $g=0,289$ ukupna godišnja energija potrebna za grijanje iznosi 73.262 kWh za simulaciju, što odgovara porastu od 36,8%, te 40.771 kWh kada se proračun provodi prema normi, što odgovara porastu od 59,9% u odnosu na početni slučaj.



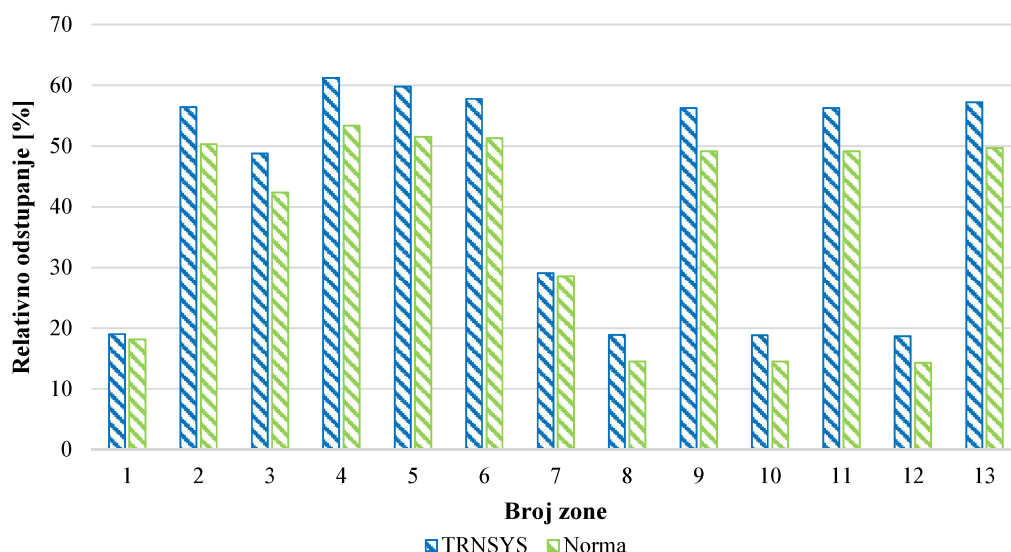
Slika 22. Relativno odstupanje grijanja po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata



Slika 23. Godišnja potreba za hlađenjem po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata

Godišnja potrebna energija za hlađenje za sve zone prikazana je na Slici 23. Suprotno od potrebe za grijanjem, potreba za hlađenjem pada smanjenjem faktora g , što je očekivano s obzirom da se smanjuju dobici od Sunca. Godišnja energija potrebna za hlađenje kod provođenja simulacije smanji se za 51,8% te iznosi 136.107 kWh, dok se ukupna potreba za hlađenjem proračunata prema normi smanji za 46,1% i iznosi 197.091 kWh. Na Slici 24. je prikazano relativno smanjenje potrebe za hlađenjem zbog izmjene svojstava prozirnih

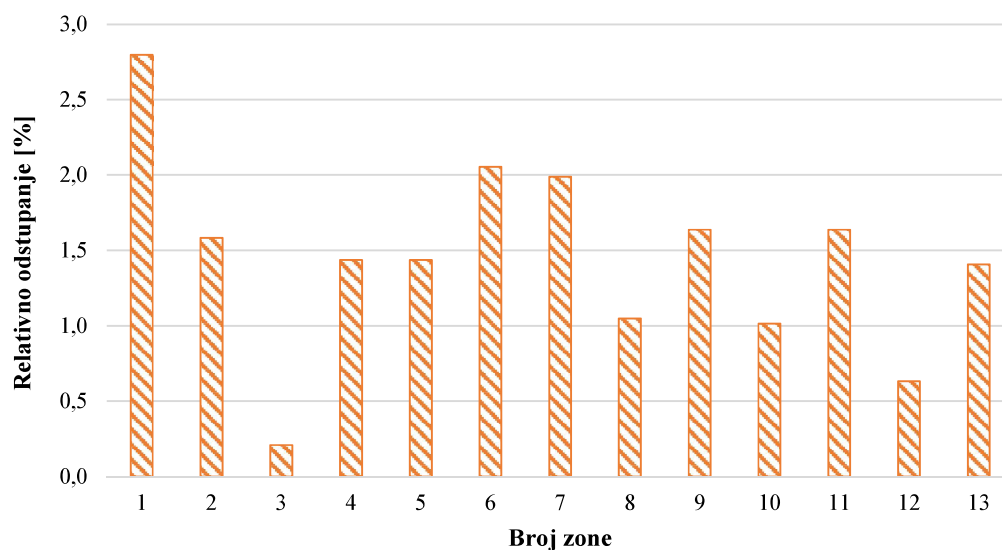
elemenata za svaku zonu. Pri čemu je relativno odstupanje definirano kao omjer razlike potrebne energije u odnosu na apsolutni iznos za početni slučaj.



Slika 24. Relativno odstupanje hlađenja po zonama pri usporedbi različitih svojstva prozirnih elemenata

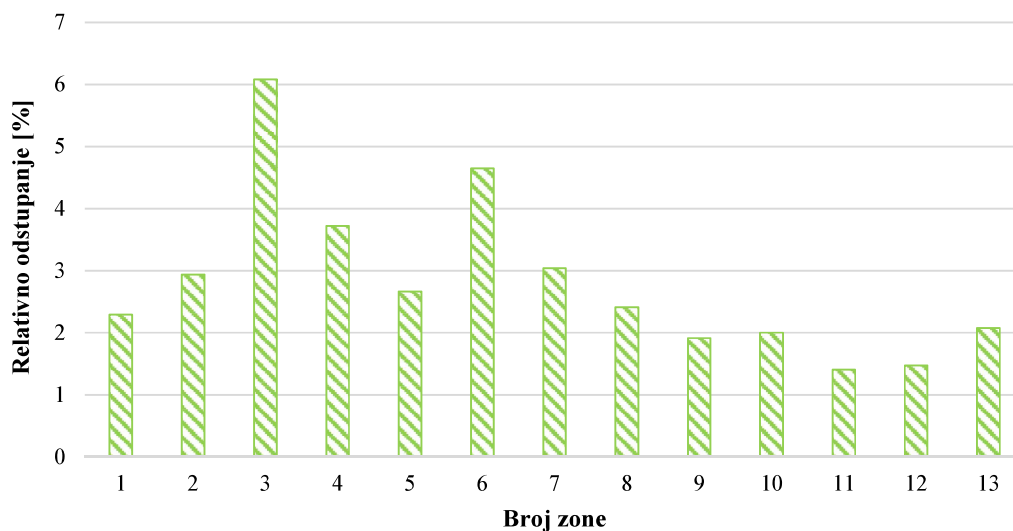
5.6. Analiza kombiniranog utjecaja dobitaka od Sunca, unutarnjih dobitaka i infiltracije na točnost modela

Utjecaj dobitaka od Sunca kroz prozirne elemente analiziran je u poglavlju 5.4. na način da su prozirni elementi u potpunosti zamijenjeni neprozirnim. U analizi prikazanoj u ovom poglavlju izolirane su i ostale komponente energijskog modela opisanog normom koje uključuju unutarnje dobitke te infiltraciju. U slučaju isključivanja unutarnjih dobitaka i dobitaka od Sunca iz modela, proračun korištenjem norme pokazuje gotovo iste rezultate kao simulacija u TRNSYS-u za sve zone. Oba slučaja ukazuju na to da prilikom odsutnosti unutarnjih dobitaka i dobitaka od Sunca nema potrebe za hlađenjem. Rezultati koji prikazuju godišnju potrebu za grijanjem ne odstupaju više od 3% kod niti jedne zone, a relativno odstupanje po zonama prikazano je Slikom 24. Relativno odstupanje je pri tome definirano kao omjer razlike potrebne energije u odnosu na apsolutni iznos proračunat TRNSYS-om. Ukupna potreba za grijanjem izračunata simulacijom iznosi 187.377 kWh, a kod proračuna putem norme iznosi 184.476 kWh, što predstavlja razliku od 1,5% u odnosu na simulaciju.



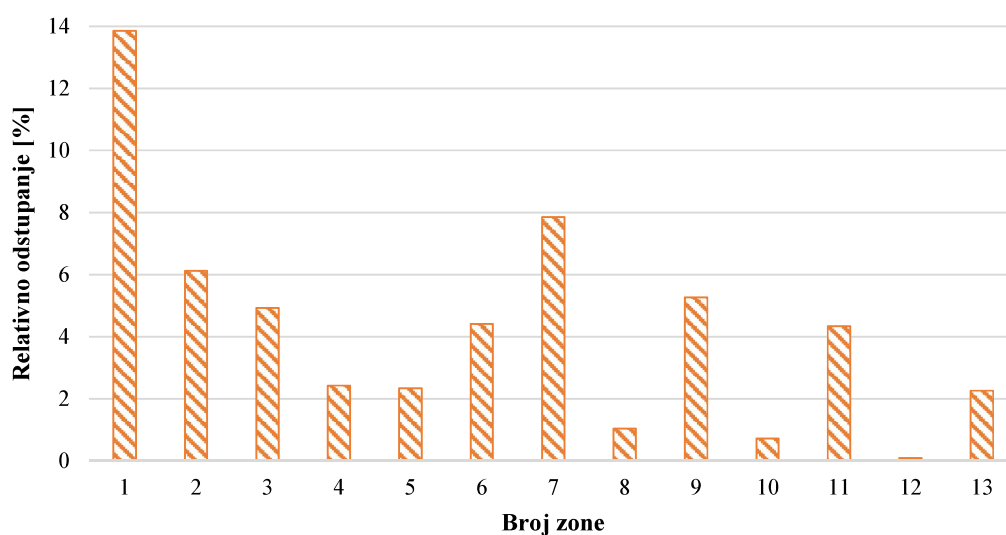
Slika 25. Relativno odstupanje grijanja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemare unutarnji dobici

Osim analize slučaja kada su iz modela izostavljeni unutarnji dobici i dobici od Sunca provedena je i analiza s pretpostavkom da nema infiltracije, odnosno dotoka vanjskog zraka u prostorije. Prilikom ovog proračuna unutarnji dobici su uzeti u obzir što je rezultiralo time da nema potreba za grijanjem, čak niti u zimskim mjesecima. Rezultati ukazuju na vrlo malu razliku u potrebnoj energiji za hlađenje izračunatoj normom i energiji koja je izračunata simulacijom. Odstupanja su proporcionalna u svim zonama te je prosječno odstupanje 2,8% (Slika 26). Relativno odstupanje je pri tome definirano kao omjer razlike potrebne energije u odnosu na apsolutni iznos proračunat TRNSYS-om. Ukupna potrebna energija za hlađenje dobivena simulacijom je 229.486 kWh, a proračunom prema normi iznosi 2,4% više, odnosno 235.095 kWh.



Slika 26. Relativno odstupanje hlađenja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemari infiltracija

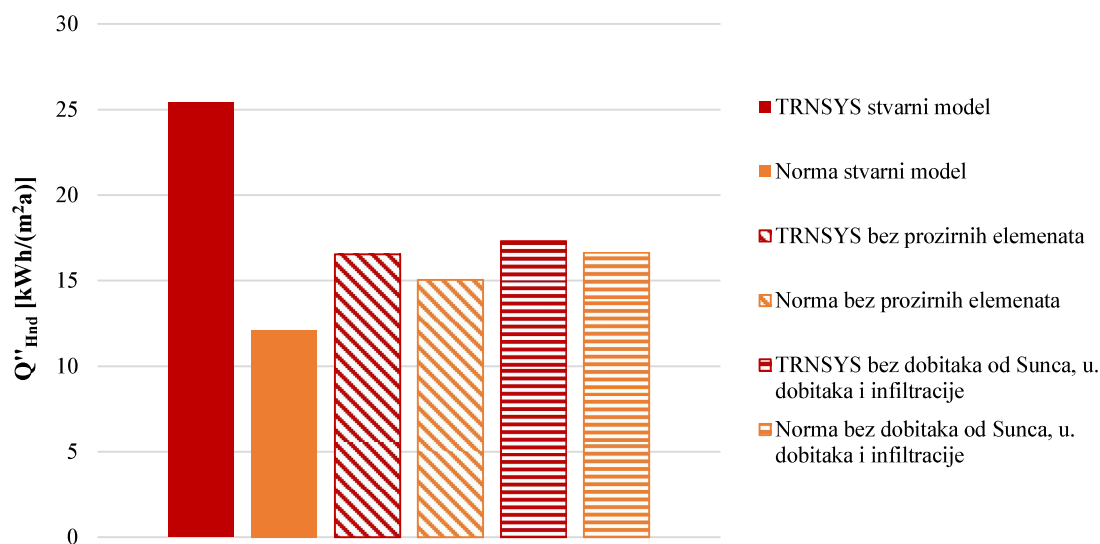
U slučaju da se istovremeno iz modela isključe dobici od Sunca, unutarnji dobici i infiltracija, preostala potrebna energija za grijanje služi kako bi nadomjestio gubitak topline transmisijom kroz ovojnicu zgrade. U tom slučaju godišnja potrebna energija za grijanje cijele zgrade iznosi 36.442 kWh kada se rezultat dobije provođenjem simulacije, a 3,9% manje kada se proračun provodi prema normi te iznosi 35.009 kWh. Relativno odstupanje potrebne energije za grijanje za sve zone prikazano je Slikom 27. Pri čemu je relativno odstupanje definirano kao omjer razlike potrebne energije u odnosu na apsolutni izračunat simulacijom u TRNSYS-u.



Slika 27. Relativno odstupanje grijanja po zonama kada se uklone prozirni elementi i zanemare unutarnji dobici i infiltracija

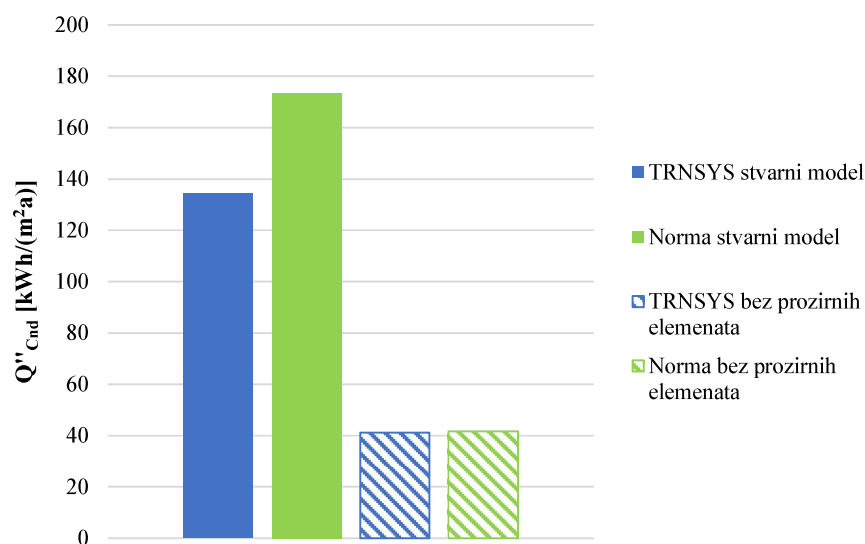
5.7. Analiza odstupanja proračuna prema normi u odnosu na simulaciju

Na samom kraju analize rezultata dana je usporedba rezultata izračunatih prema normi s onima dobivenim simulacijom kroz tri prethodno navedena primjera: stvarnom modelu zgrade, modelu kada su prozirni elementi zamijenjeni neprozirnim i modelu kada se uz dobitke od Sunca izostavljene i unutarnji dobitci te infiltracija. U ovom poglavlju rezultati su prikazani kao specifična potreba za energijom za grijanje i hlađenje svedena na metar kvadratni korisne površine zgrade. Iz Slike 28., koja prikazuje specifičnu godišnju potrebnu energiju za grijanje, može se zaključiti da se izdvajanjem pojedinih komponenti iz početnog modela smanjuje odstupanje u rezultatima. Naime početna razlika kada se promatrao stvarni model iznosila je 47,6%, kada su u modelu prozirni elementi zamijenjeni neprozirnim, a time isključeni i dobitci od Sunca, razlika u rezultatima se smanjila na 8,9%. Navedeno ukazuje na značajnu razliku u dijelu modela koja računa dobitke od Sunca u normi u odnosu na onaj koji stoji u pozadini simulacije u TRNSYS-u. Daljnjim isključivanjem unutarnjih dobitaka i dobitaka/gubitaka uslijed izmjene zraka ventilacijom razlika u rezultatima se smanjuje na 3,9%, što predstavlja razliku u komponenti modela koja opisuje izmjenu topline transmisijom.



Slika 28. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje

U slučaju kada uz zamjenu prozirnih elemenata neprozirnim iz modela eliminiramo i unutarnje dobitke i izmjenu zraka s okolišem model ne zahtjeva energiju za hlađenje. Stoga je na Slici 29. prikazana usporedba preostala dva modela. Razlika u potrebnoj energiji za hlađenje u slučaju stvarnog modela zgrade iznosi 29,4% te se zanemarivanjem dobitaka od Sunca razlika smanji na 1,1%, što potvrđuje zaključak o velikoj razlici koja proizlazi iz matematičkog modela kojim se računaju dobitci od Sunca kroz prozirne elemente.



Slika 29. Specifična godišnja potrebna energija za hlađenje

6. Zaključak

U radu je provedena usporedba metoda za proračun energijskih potreba zgrade na primjeru referentne NZEB bolnice u kontinentalnoj Hrvatskoj. Uspoređene su potrebne energije za grijanje i hlađenje proračunate prema postupku opisanome u normi HRN EN ISO 52016-1 s onima dobivenima simulacijom u programu TRNSYS. Program TRNSYS provodi izrazito detaljne simulacije na temelju složenih energijskih bilanci koje opisuju nestacionarno ponašanje zgrade. Takve detaljne simulacije poslužile su kao etalon za procjenu odstupanja rezultata dobivenih normom.

Norma HRN EN ISO 52016-1 sadrži skup jednadžbi proračuna za određivanje energijskih potreba zgrade te je za provođenje proračuna potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje prema satnoj ili mjesečnoj metodi. Odgovarajuće jednadžbe koje opisuju izmjenu topline kroz elemente zone te toplinsku ravnotežu zone su potom strukturirane i sistematizirane u dvije matrice; matricu konstanti koja sadrži koeficijente koji stoje uz nepoznate vrijednosti, (temperature i potrebni toplinski tok) te matricu koja sadrži poznate neovisne parametre. Matrica rješenja koja sadrži tražene vrijednosti dobiva se operacijom dijeljenja matrice poznatih vrijednosti s matricom konstanti. Postupak formiranja i rješavanja sustava matrica ponavlja se onoliko puta koliko vremenskih koraka sadrži promatrani proračunski period. Opisani je postupak razvijen za satnu metodu proračuna u obliku programskog koda pomoću programa MATLAB. Nakon kreiranja algoritma za provođenje traženog proračuna proveden je niz analiza i usporedbi kako bi se provjerila točnost matematičkog modela sadržanog u normi. Unutar norme velika je važnost dodijeljena postupku zoniranja, načinu proračuna nekondicioniranih zona te pretpostavci o toplinskoj izoliranosti zona.

Prilikom usporedbe rezultata proračuna provedenog prema normi i rezultata dobivenih simulacijom uočene su velike razlike pri čemu je godišnja potreba za toplinskom energijom izračunata preko norme manja za 47,6%, a potrebna rashladna energija veća za 29,4% u odnosu na detaljne simulacije. Uzevši u obzir orijentaciju i ostakljenost pojedinih zona te mjesece u kojima se pojavljuju najveća odstupanja može se zaključiti da norma precjenjuje utjecaj dobitaka od Sunca, što uzrokuje smanjenu potrebu za grijanjem i povećanu potrebu za hlađenjem.

Također je provedena simulacija kojom se analizira utjecaj unutarnjeg kapaciteta zone te toplinskog kapaciteta konstrukcije. Obje analize pokazale su da toplinski kapacitet zone, odnosno toplinski kapacitet ovojnice zgrade nema veliki utjecaj na proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje. Pri tome su odstupanja za analizu utjecaja kapaciteta zone iznosila svega

0,001%. U slučaju primjene toplinskog kapaciteta prema tablici iz norme umjesto računanja odgovarajućeg za sastav zida, pokazalo se odstupanje od 6,8% u režimu grijanja i 0,5% u režimu hlađenja.

Analiza utjecaja međusobne toplinske izoliranosti zona analizirana je u programu TRNSYS pomoću postavke kojom se određuju rubni uvjeti na pojedinom gradbenom elementu zone. Uz pretpostavku da su zone toplinski izolirane, što znači da ne postoji izmjena topline kroz elemente između zona, prilikom proračuna potrebne energije za grijanje učinjena je prosječna pogreška od 13,4% po zoni u odnosu na slučaj kada zone nisu toplinski izolirane. Ukupna godišnja energija za grijanje veća je u slučaju toplinski neizoliranih zona te se, gledajući zgradu kao cjelinu, razlikuje 4%. Prosječna pogreška za slučaj toplinski izoliranih zona kod proračuna potrebne energije za hlađenje iznosi 28,3% po zoni, dok je odstupanje kada se zgrada promatra kao cjelina 16%. Pri tome je u režimu hlađenja veća potreba za energijom kada su zone toplinski izolirane.

U poglavlju 5.4. provođenjem proračuna i simulacije s pretpostavkom da su svi prozirni elementi na zgradi zamijenjeni neprozirnim ispitano je utjecaj toplinskih dobitaka od Sunca. U tom slučaju je energija potrebna za grijanje izračunata prema normi 8,9% manja, a energija potrebna za hlađenje 1,1% veća od one izračunate simulacijom. Navedeno potvrđuje pretpostavku glavnog uzroka odstupanja te je provedena daljnja analiza koja je uključivala provedbu proračuna s izmijenjenim svojstvima prozirnih elemenata. Pri tome je stupanj propuštanja Sunčevog zračenja kroz staklo smanjen s vrijednosti 0,591 na 0,289, dok je koeficijent prolaza topline ostao nepromijenjen. Rezultati proračuna prema normi u odnosu na one dobivene simulacijom ukazuju na neproporcionalnu promjenu energijskih potreba s obzirom na njihov relativni iznos. Na primjer u zoni 2 razlika prilikom zamjene svojstava stakla, u slučaju da se proračun provodi simulacijom, iznosi 2.656 kWh, što predstavlja porast od 33,9%. Kada se proračun provodi prema normi, razlika iznosi bliskih 2.510 kWh, no u tom slučaju to predstavlja porast od 60,1%.

Također je provedena analiza kojom se isključuje utjecaj unutarnjih dobitaka, infiltracije te oboje. Zgrada bez prozirnih elemenata na vanjskoj ovojnici i unutarnjih dobitaka zahtjeva samo energiju za grijanje, te se njen ukupni iznos na godišnjoj razini razlikuje svega 1,5% kod proračuna normom u odnosu na simulaciju. U slučaju kada se umjesto unutarnjih dobitaka izostavi infiltracija, potrebna je samo energija za hlađenje te je odstupanje rezultata dobivenih proračunom prema normi 2,8% u odnosu na one dobivene simulacijom. Kada se u istoj zgradi iz modela uz dobitke od Sunca izostave i unutarnji dobici i infiltracija, preostala potrebna

energija za grijanje koristi se za nadomještanje toplinskih gubitaka transmisijom kroz neprozirne elemente ovojnice te njezino odstupanje iznosi 3,9% kod proračuna prema normi u odnosu na simulaciju.

Analizom rezultata može se zaključiti kako se najveće odstupanje matematičkog modela prikazanog u normi pojavljuje kod dijela modela koji proračunava utjecaj dobitaka od Sunca na energijsku bilancu toplinske zone, što izrazito utječe na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. U usporedbi s odstupanjima kod prozirnih elemenata manja su odstupanja uočena i u dijelovima proračuna koji se odnose na unutarnje dobitke, transmisiju kroz neprozirne elemente, infiltraciju, a samim time i izmjenu topline izmjenom zraka općenito. Uzroke zamijećenih odstupanja potrebno je detaljnije provjeriti, što će biti učinjeno u sklopu većeg projekta, kojega je ovaj rad samo jedan segment. Projekt uključuje provedbu sličnih simulacija, proračuna i analiza na svim kategorijama referentnih zgrada u Republici Hrvatskoj te će potpunije informacije o uzrocima odstupanja u normi biti dostupne nakon završetka projekta.

LITERATURA

- [1] HRN EN ISO 52016-1 „Energijska svojstva zgrada – Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 1. dio: Postupci proračuna“, 2017.
- [2] HRN EN ISO 52017-1 „Energijska svojstva zgrada – Osjetna i latentna toplinska opterećenja i unutarnje temperature – 1. dio: Opći postupci proračuna“, 2017.
- [3] HRI CEN ISO/TR 52016-2 „Energijska svojstva zgrada – Energija potrebna za grijanje i hlađenje, unutarnje temperature i osjetna i latentna toplinska opterećenja – 2. dio: Objašnjenje i obrazloženje norma ISO 52016-1 i ISO 52017-1“, 2017.
- [4] Izvješće prema članku 5(2) Direktive 2010/31/EU i članku 6 Uredbe (EU) 244/2012 od 16.01.2012: „Minimalni zahtjevi na energetska svojstva zgrada bolnica za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku za razdoblje do 1970., 1971.-2005., iza 2006. i gotovo nula energetske zgrade“, Zagreb, 2014.
- [5] Tehnički propis od racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, (NN 128/15), 2015.
- [6] TRNSYS 17, Volume 4, Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin - Madison, 2012.